Dr. Joh. Müller's

Grundriß

der

Physik und Meteorologie

für

Lyceen, Gymnasien, Gewerbe- und Realschulen,

sowie zum

Selbstunterrichte

bearbeitet

von

E. Reichert,

Professor an der höheren Bürgerschule zu Freiburg im Breisgau.

Dreizehnte vermehrte und verbesserte Auflage.

Mit 622 in den Text eingedruckten Holzstichen und
einer Spektraltafel in Farbendruck.

Nebst einem Anhange:

Physikalische Aufgaben und deren Auflösungen enthaltend.

Braunschweig,

Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn.

1881.

Vorrede zur zwölften Auflage.

Die erste Auflage des vorliegenden „Grundrisses der Physik und Meteorologie" erschien im Frühjahr 1846. Wenn nun jetzt, nach achtundzwanzig Jahren, bereits eine zwölfte Auflage desselben nötig geworden ist, so dürfte darin wohl ein Beweis liegen, daß das Werk gerade in dieser Form, bei dieser Behandlungsweise des Gegenstandes seinem Zweck entspricht.

Es ist die Aufgabe eines elementaren Lehrbuchs der Naturlehre, die Fundamentalgesetze, mit Beseitigung aller Verwickelungen, welche die Orientierung erschweren, mit Übergehung aller Specialitäten, welche die Klarheit im Vortrag und die Übersichtlichkeit in der Anordnung des Stoffes stören könnten, möglichst leicht faßlich, ich möchte sagen, plastisch hinzustellen. Dabei dürfen dem Schüler die physikalischen Wahrheiten durchaus nicht in dogmatisierender Manier als fertige Resultate vorgetragen werden, sondern überall muß ihm die Ableitung der Gesetze klar gemacht werden, muß er den Zusammenhang kennen lernen zwischen den Thatsachen und den aus einer logischen Kombination der Thatsachen hervorgegangenen Vorstellungen über die Ursachen und den Zusammenhang der Erscheinungen; kurz: der Schüler muß auch im elementaren Unterricht in die physikalische Denk- und Schlußweise eingeführt, mit dem Wesen der induktiven Methode vertraut gemacht werden.

Es ist dies freilich eine schwierige Aufgabe, und ich weiß wohl, daß ich dieselbe in dem vorliegenden Buche nur unvollkommen gelöst habe. Bei der Ausarbeitung jeder folgenden Auflage war ich aber bemüht, mich dem vorgesteckten Ziele mehr und mehr zu nähern, und so ist denn jede folgende

Auflage dieses Grundrisses im Vergleich mit der vorhergehenden eine wesentlich verbesserte. Namentlich war ich bemüht, die Ausdrucksweise möglichst zu vollenden und abzurunden, wobei aber mein Bestreben vor allen Dingen auf Klarheit und Verständlichkeit gerichtet war.

Vorzugsweise gilt dies aber für die drei letzten Auflagen, welche, ohne über den Standpunkt des Werkes hinaus zu gehen, weit mehr mathematisch gehalten worden sind, als dies bei den früheren Auflagen der Fall war, und dadurch gerade hat die Übersichtlichkeit der vorgetragenen Gesetze wesentlich gewonnen. Die allgemeine Verständlichkeit ist dadurch nicht beeinträchtigt worden, denn die eingeführten Formeln sind, wo irgend möglich, abgeleitet, ihre Bedeutung aber stets genügend erläutert worden. Ferner ist unser Grundriß durch diese mehr mathematische Behandlungsweise in eine innigere Beziehung zu dem mathematischen Supplementband getreten, dessen erste Auflage gleichzeitig mit der siebenten und dessen zweite Auflage gleichzeitig mit der neunten des Grundrisses erschienen ist.

In diesem mathematischen Supplementbande sind einzelne wichtigere Abschnitte der Physik einer eingehenderen mathematischen Behandlung unterworfen worden, und dadurch bildet derselbe nach dieser Seite hin eine Ergänzung des Grundrisses für solche Lehranstalten, welche die mathematischen Disciplinen in ausgedehnterem Maße kultivieren können.

Eine wesentliche Umgestaltung hat bereits in der achten Auflage die Theorie der Volta'schen Säule erfahren, indem als Sitz der elektromotorischen Kraft nur noch die Berührungsstelle der Metalle mit der erregenden Flüssigkeit bezeichnet wird. Dadurch wird die Theorie der Säule weit einfacher, als sie es nach der in den früheren Auflagen des Grundrisses gegebenen Darstellung war.

In der neunten Auflage ist vorzugsweise die Akustik, in der zehnten ist der Abschnitt von den thermo-elektrischen Strömen gänzlich umgearbeitet worden. Eine ganz besondere Berücksichtigung hat in derselben die Wärmelehre gefunden, in welcher, soweit es in einem elementaren Werke möglich ist, auch die mechanische Wärmetheorie besprochen wurde.

In der elften Auflage erstreckten sich die Verbesserungen und Bereicherungen ziemlich gleichförmig über alle Kapitel. Nur die stets wachsende Bedeutung der Spektralanalyse hat in derselben eine namhafte Bereicherung der Optik bedingt.

Die vorliegende zwölfte Auflage unterscheidet sich außer einigen Nachträgen nur durch Beseitigung einiger Druckfehler, welche in der elften Auflage stehen geblieben waren.

Obgleich der Inhalt des Buches in den letzten Auflagen nicht unerheblich bereichert wurde, blieb doch der Umfang desselben ziemlich unverändert, weil ich eifrigst bemüht war, durch möglichst präcise Darstellung einerseits Raum zu gewinnen und andererseits die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

Einen großen Vorzug glaube ich auch den neueren Auflagen durch die Beigabe einer Sammlung von Aufgaben gesichert zu haben, welche sich den in den einzelnen Paragraphen des Grundrisses vorgetragenen Lehren enge anschließen, und sowohl beim Schulunterricht als auch beim Selbststudium zur Erläuterung und Einübung derselben wesentlich beitragen. Diese Aufgaben, welche sich möglichst gleichförmig über alle Teile der Physik verbreiten, sind zum großen Teil denjenigen Aufgaben des Supplementbandes entnommen, welche sich nur auf das im Grundriß selbst vorgetragene Material beziehen.

Auch durch eine erhebliche Anzahl neugestochener Figuren sind die neueren Auflagen bereichert worden, und zwar nicht etwa Figuren, welche nur zur Ausschmückung des Werkes dienen, sondern solche, welche in der innigsten Beziehung zum Texte stehen und zur Kenntnis der Apparate und zum Verständnis der vorgetragenen Materien wesentlich beitragen.

Freiburg, im März 1875.

J. Müller.

Vorrede zur dreizehnten Auflage.

Am 3. Oktober 1875 starb dahier der Hofrath Dr. Johann Heinrich Jakob Müller, nachdem er länger als drei Jahrzehnte unserer Hochschule als Professor der Physik angehört hatte. Strenge gegen sich selbst, human gegen Andere bekleidete Müller sein Amt mit seltener Gewissenhaftigkeit und Kollegialität; seinen Freunden bewies er eine unwandelbare Anhänglichkeit und Treue, und stets war er bereit, Jedermann mit Rat oder That zu unterstützen, der ihn darum in Anspruch nahm.

Die Wissenschaft verdankt Müller eine Reihe schöner selbständiger Forschungen, von denen die Abhandlung über die isochromatischen Kurven, die zuerst von ihm hergestellten Photographieen des Sonnenspektrums, die Untersuchungen über die Intensität und Wellenlänge der Wärmestrahlen im Sonnenspektrum, sowie die Abhandlungen über die Magnetisierbarkeit von Stahl und Eisen durch den galvanischen Strom hier besonders erwähnt werden mögen.

Die eigentliche Aufgabe seines Lebens fand jedoch Müller darin, seine Wissenschaft durch Herausgabe von Lehrbüchern in diejenigen Kreise hinauszutragen, welche bei ihrer Beschäftigung mit Naturwissenschaften überhaupt einer gründlichen Kenntnis der Elemente der Physik nicht entbehren können, ohne sich deshalb vorzugsweise dem Studium dieser Wissenschaft widmen zu müssen.

Unter diesen Werken ist das „Lehrbuch der Physik und Meteorologie" als Müller's Hauptarbeit zu bezeichnen; dasselbe erschien in einem Zeitraum von 24 Jahren (1844 bis 1868) in sieben Auflagen; die Herausgabe der achten Auflage, noch von Müller begonnen und von Professor Dr. Pfaundler in Innsbruck fortgesetzt, wird demnächst vollendet sein. Dieses Lehrbuch, kurz als der „Müller-Pouillet" bezeichnet, ist in Deutschland nicht nur unter allen physikalischen Lehrbüchern das verbreitetste, sondern hat auch den Hauptanteil an der Verbreitung der physikalischen Kenntnisse in unserm Vaterlande.

Für solche, welche sich mehr nur mit den Grundlehren der Physik vertraut machen wollen, schrieb Müller den vorliegenden „Grundriß“ und eine noch gedrängter zusammengefaßte „Schule der Physik“. Die zwölf Auflagen des Grundrisses, welche Müller von 1846 bis 1875 bearbeitete, beweisen mehr als alles andere, daß auch dieses Werk einem allgemeinen Bedürfnis entsprochen hat. Ein „mathematischer Supplementband zum Grundriß“, dessen dritte Auflage im Jahre 1875 erschien, bezweckt noch, Anfänger mit der mathematischen Behandlung physikalischer Aufgaben vertraut zu machen.

Im Jahre 1856 erschien Müller's „Lehrbuch der kosmischen Physik“, in welchem die populäre Astronomie oder die Physik des Himmels und die physikalische Geographie oder die Physik der Erde systematisch zusammengestellt sind. Von diesem Werke, das bis zum Jahre 1875 vier Auflagen erlebte, sagt der Verfasser: „Ich habe das Buch mit Fleiß und Sorgfalt, mit Lust und Liebe ausgearbeitet. Möge es dazu beitragen, den Naturwissenschaften Freunde zu gewinnen und all das Gute zu fördern, was mit ihrer Kultur und Verbreitung verbunden ist.“

Von den übrigen physikalischen Schriften Müller's seien noch erwähnt „Die Grundzüge der Krystallographie“ und eine neue Herausgabe der Euler'schen Briefe über physikalische und philosophische Gegenstände, denen Ergänzungen gleichfalls in Briefform beigegeben sind.

Die Bearbeitung seiner Lehrbücher war für Müller eine Herzenssache; er las keine Abhandlung, besuchte kein physikalisches Institut, ohne sogleich daran zu denken, wie er das Gelesene und das Gesehene für seine Lehrbücher verwenden könne. Was Müller in seinen Büchern giebt, ist von ihm durch eigene Anschauung geprüft, durch Erfahrung erprobt und gewissenhaft durchgearbeitet; er weiß deshalb auch, wo die Schwierigkeiten, sei es des Versuchs oder des Verständnisses, liegen und versteht es vortrefflich, sich in den Gedankengang des Lesers zu versetzen und ihn über die Schwierigkeiten hinwegzuführen. Seine Werke hat Müller mit größtenteils selbst gezeichneten, äußerst genauen und künstlerisch vollendeten Abbildungen ausgestattet, welche sich innig an den Text anschließen und zum leichten Verständnis des behandelten Gegenstandes wesentlich beitragen. Welch hohes Verdienst sich Müller auch hierdurch um die Verbreitung physikalischer Kenntnisse erworben hat, geht daraus hervor, daß seine Abbildungen für alle in der Folge erschienenen naturwissenschaftlichen Werke mustergültig geworden sind [1]).

---

[1]) Ausführlicheres über Müller's Leben und Wirken enthält ein Nekrolog in der Beilage zu Nr. 302 der Allgemeinen Zeitung von 1875 und die Gedächtnisrede des Professor Dr. E. Warburg auf Dr. Joh. Heinr. Jak. Müller bei dessen akademischer Totenfeier am 16. Juli 1877. Freiburg. H. M. Poppen u. Sohn. 1877.

Als daher im Frühjahr 1879 die Verlagsbuchhandlung bei mir anfragte, ob ich die weitere Bearbeitung des Grundrisses übernehmen wolle, erklärte ich mich sofort bereit, mich dieser Arbeit zu unterziehen, um dadurch das Gefühl ehrfurchtsvoller Pietät gegen den Urheber dieses Werkes nach Kräften zu bethätigen. War es mir doch vergönnt, Müller zu meinem Lehrer und, was noch mehr ist, zu meinem langjährigen väterlichen Freunde zu haben, der stets in meiner dankbaren Erinnerung fortleben wird.

Geleitet von solcher Gesinnung konnte es nicht meine Absicht sein, ein Buch, das durch zwölf Auflagen hindurch sich zu immer größerer Vollendung erhob, seiner eigentümlichen Anlage und Durchführung wesentlich zu entkleiden und nach einem ganz veränderten Plane in die Öffentlichkeit treten zu lassen.

Gleichwohl kann nicht unerwähnt bleiben, daß Manches in anderer Form gegeben, Manches auch ganz neu aufgenommen wurde. Dahin gehören beispielsweise: die strenge Unterscheidung zwischen Atom und Molekül, die Darlegung der Grundbegriffe der Bewegung und der Arbeit, die Aufnahme des Princips der virtuellen Geschwindigkeiten, die Beschreibung der Funkeninduktoren, der Gas- und der Metallentladungen, ferner die Erklärung des Telephons und der Gramme'schen Maschine, eine veränderte Fassung und Ableitung des Gay-Lussac'schen Gesetzes über die Ausdehnung der Gase u. s. w.

Andererseits wurde Manches, was nach der heutigen strengeren Auffassung nicht mehr so recht in das Gebiet der Physik gehört oder gar veraltet ist, kürzer behandelt, wie z. B. die Wasserräder und die Dampfmaschine, oder ganz weggelassen wie z. B. die Wassersäulenmaschine oder die elektro-chemische Theorie.

Einem vielfach geäußerten Wunsche glaubte ich noch dadurch entsprechen zu sollen, daß zur Nachhülfe für Solche, die sich selbst unterrichten wollen, die Resultate der Auflösungen zu den Aufgaben in einem besondern Anhange mitgeteilt sind.

Schließlich sei noch auf eine scheinbare Inkonsequenz in der Orthographie aufmerksam gemacht. Mitten in der Drucklegung des Werkes traten nämlich die zunächst für Preußen maßgebenden Vorschriften über die deutsche Rechtschreibung in Kraft, so daß dieselben nur für die zweite Hälfte des Buches zur Anwendung kommen konnten.

Freiburg, im Januar 1881.

E. Reichert.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

Erstes Buch.

Mechanik oder die Gesetze des Gleichgewichts und der Bewegung.

Erstes Kapitel.

Gleichgewicht der Kräfte an einfachen Maschinen.

Zweites Kapitel.

Gleichgewicht der Teile fester Körper unter einander.

Drittes Kapitel.

Hydrostatik oder die Lehre vom Gleichgewichte der Flüssigkeiten.

Viertes Kapitel.

Molekularwirkungen zwischen festen und flüssigen Körpern, sowie zwischen den einzelnen Teilchen der Flüssigkeiten selbst.

Fünftes Kapitel.

Aërostatik oder die Lehre vom Gleichgewicht der Gase.

Sechstes Kapitel.

Anziehung zwischen gasförmigen und festen, sowie zwischen gasförmigen und flüssigen Körpern.

Siebentes Kapitel.

Bewegung fester Körper.

Achtes Kapitel.

Hydraulik oder die Bewegungsgesetze der Flüssigkeiten.

Neuntes Kapitel.

Bewegung der Gase.

Zweites Buch.

Akustik oder die Lehre vom Schall.

Erstes Kapitel.

Fortschreitende und stehende Wellen.

Zweites Kapitel.

Gesetze der Schwingungen und Töne fester Körper.

Drittes Kapitel.

Die musikalischen Instrumente, das Stimm- und das Gehörorgan.

Drittes Buch.

Optik oder die Lehre vom Licht.

Erstes Kapitel.

Verbreitung des Lichtes.

Zweites Kapitel.

Katoptrik oder die Lehre von der Reflexion des Lichtes.

Drittes Kapitel.

Dioptrik oder Brechung des Lichtes.

Viertes Kapitel.

Die Farbenlehre.

Fünftes Kapitel.

Vom Auge und den optischen Instrumenten.

Sechstes Kapitel.

Interferenzerscheinungen.

Siebentes Kapitel.

Chemische Wirkungen des Lichtes.

Viertes Buch.

Die elektrischen Erscheinungen.

Erstes Kapitel.

Vom Magnetismus.

Zweites Kapitel.

Von der Reibungselektricität.

Drittes Kapitel.

Vom Galvanismus.

Viertes Kapitel.

Induktionserscheinungen.

Fünftes Kapitel.

Thermo-elektrische Ströme und tierische Elektricität.

Fünftes Buch.

Von der Wärme.

Erstes Kapitel.

Ausdehnung.

Zweites Kapitel.

Veränderung des Aggregatzustandes.

Drittes Kapitel.

Specifische Wärme der Körper.

Viertes Kapitel.

Fortpflanzung der Wärme.

Fünftes Kapitel.

Quellen der Wärme.

Sechstes Buch.

Meteorologie.

Erstes Kapitel.

Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche.

Zweites Kapitel.

Die Atmosphäre, ihr Druck und ihre Strömungen.

Drittes Kapitel.

Von der atmosphärischen Feuchtigkeit.

Viertes Kapitel.

Optische Erscheinungen der Atmosphäre.

Fünftes Kapitel.

Von der atmosphärischen Elektricität und dem Erdmagnetismus.

Sammlung von Aufgaben.

Auflösungen der Aufgaben.

Einleitung.

Begriff. Die großartigen Schauspiele, welche uns die Natur täglich 1
darbietet, regen unsere Wißbegierde so mächtig an, daß wir uns unwillkürlich hingezogen fühlen, über die Gesammtheit der Ursachen nachzudenken, welche diese wunderbaren Wirkungen hervorbringen. Es ist nun die Aufgabe der Naturwissenschaften, sich mit diesen Fragen zu beschäftigen, den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Naturerscheinungen zu ermitteln und sie, so weit es möglich ist, auf ihre Ursachen zurückzuführen.

Die gesammten Naturwissenschaften haben es mit Körpern zu thun; hier ist aber das Wort „Körper" nicht in dem Sinne des Mathematikers zu nehmen, der nur die Raumverhältnisse betrachtet und nicht nach dem Stoffe fragt, welcher den Raum erfüllt; der Naturforscher betrachtet gerade die Eigenschaften der den Raum erfüllenden Materie.

Das innere Wesen der Körper ist uns verschlossen, sie sind uns nur durch die äußere Erscheinung bekannt, d. h. wir wissen von ihnen zunächst nur das, was wir durch die Vermittelung unserer Sinne von ihnen erfahren. Ein Körper außer Zusammenhang mit unseren Sinnen ist für uns so gut wie nicht vorhanden. Es ist möglich, ja wahrscheinlich, daß noch Manches in der Natur um uns her vorgeht, wovon wir keine Ahnung haben, weil uns dafür gewissermaßen ein Sinn fehlt.

Die Naturwissenschaften haben nun zwischen den durch Vermittelung der Sinne zum Bewußtsein gebrachten Erscheinungen einen Zusammenhang auszumitteln und sie so zusammenzustellen, wie sie sich einander erläutern und bedingen. Ist man im Stande, eine Erscheinung auf ihren Zusammenhang mit anderen zurückzuführen, so ist diese Erscheinung erklärt, und man kennt ein Naturgesetz, sobald man die unveränderliche Zusammenhangsart von Naturerscheinungen kennt, wenn uns auch die letzten Ursachen unbekannt bleiben.

2 **Eintheilung.** Das große Gebiet der Naturwissenschaften zerfällt zunächst in zwei große Abtheilungen, die Naturbeschreibung und die Naturlehre. Die Naturbeschreibung, gewöhnlich Naturgeschichte genannt, lehrt uns die Beschaffenheit einzelner Gegenstände kennen und ordnet sie nach ihrer Aehnlichkeit in Systeme; die Naturlehre will dagegen die Gesetze zur Einsicht bringen, nach welchen die Veränderungen in der Natur vor sich gehen und nach welchen die verschiedenen Körper auf einander einwirken.

Die Physik ist derjenige Theil der Naturlehre, welcher es mit den Gesetzen solcher Erscheinungen der leblosen Natur zu thun hat, die nicht auf einer Veränderung der Bestandtheile der Körper beruhen; denn damit beschäftigt sich die Chemie.

Begreiflicher Weise läßt sich das Feld dieser beiden Wissenschaften nicht immer scharf trennen, und viele Erscheinungen müssen sowohl in der einen wie auch in der anderen besprochen werden. Beide Wissenschaften, Physik und Chemie, sind aufs Innigste mit einander verwandt, ja sie bilden gewissermaßen ein Ganzes, welches nur deshalb äußerlich getrennt erscheint, weil die Masse des zu untersuchenden Materials zu sehr angewachsen ist.

3 **Methode.** Die Erkenntnißquelle sowohl als auch der Weg zur Erkenntniß ist nicht und kann nicht für alle Wissenschaften derselbe sein. Der Mathematiker kann, von selbstgeschaffenen Begriffen ausgehend, aus sich heraus seine ganze Wissenschaft entwickeln, ja es wäre denkbar, daß ein Mensch in seinen vier Wänden, abgeschlossen von aller Naturanschauung, die ganze Mathematik aus den Begriffen des Raumes und der Zahl construirte. In dieser Beziehung ist die Mathematik eine rein speculative Wissenschaft, was die Naturwissenschaften durchaus nicht sind und nicht sein können, da sie Dinge behandeln, welche einzig und allein durch sinnliche Wahrnehmung, also auf dem Wege der Erfahrung, zu unserem Bewußtsein kommen.

Den Alten war eine auf Erfahrung sich stützende Naturforschung in unserem Sinne gänzlich unbekannt; wir finden bei ihnen nur philosophische Speculationen über die Welt überhaupt, über die Entstehung und das Urwesen aller Dinge, und es kann uns nicht wundern, wenn die auf diesem Wege entwickelten Vorstellungen über die Natur der Dinge oft nichtssagend sind, oder sogar mit der Erfahrung in directem Widerspruche stehen.

Auch im Mittelalter wurden die Naturwissenschaften nur wenig weiter entwickelt, theils weil die ganze geistige Thätigkeit jener Zeit anderen Interessen zugewandt war, theils weil die Aristotelische Philosophie in so hohem Ansehen stand, daß dadurch jede weitere Prüfung der in derselben ausgesprochenen Naturansichten und also auch jeder Fortschritt abgeschnitten war.

Erst Galiläi (1564 bis 1642) schlug den Weg der Erfahrung ein und Baco von Verulam (1561 bis 1626) zeigte, daß es nur auf diese Weise möglich sei, zur Kenntniß der Naturgesetze zu gelangen.

Die einzige Quelle unserer Naturerkenntniß ist die sinnliche Wahrnehmung, die Erfahrung, die Beobachtung. Aus die-

ser Quelle schöpfen wir das Material, welches durch unser geistiges Zuthun zur Wissenschaft verarbeitet und vereinigt werden soll.

Die wissenschaftlichen Wahrnehmungen machen wir entweder an Veränderungen, die uns die Natur selbst darbietet, oder wir nehmen mit den Körpern verschiedene Operationen vor, durch welche sie genöthigt werden, gewisse Erscheinungen hervorzubringen. Im ersten Falle machen wir eine Beobachtung, im zweiten stellen wir einen Versuch an.

Durch gute Beobachtungen und zweckmäßig angestellte Versuche lernen wir den äußeren Zusammenhang der Erscheinungen kennen. Dieser Zusammenhang ist es, was wir ein Naturgesetz nennen.

Auf dem Wege der Erfahrung können wir zur Kenntniß dieser Gesetze gelangen, wenn uns auch der innere Zusammenhang, die Natur der Kräfte, das Wesen der Dinge, ganz und gar unbekannt ist. Das Gesetz der Brechung des Lichtes war lange schon bekannt, ehe man über die Natur des Lichtes im Reinen war; ebenso kennen wir die Gesetze der elektrischen Vertheilung, obgleich wir über das Wesen der Elektricität selbst so gut wie nichts wissen.

Nur der äußere, nicht der innere Zusammenhang kann durch die Erfahrung gefunden werden. Ueber die inneren Ursachen der Erscheinungen, über das Wesen der Kräfte, welche sie hervorbringen, können wir nur Hypothesen aufstellen. Die Hypothesen sind gleichsam Fragen, die man an die Natur stellt, worauf sie aber nicht mit Ja oder Nein antwortet, sondern: es kann so sein, oder: es kann nicht so sein.

Aus einer Hypothese, die man über die Ursache mehrerer zusammenhängender Erscheinungen aufgestellt hat, lassen sich meistens weitere Folgerungen ziehen, welche durch fernere Beobachtungen entweder bestätigt oder als unzulässig erkannt werden. Je mehr Thatsachen sich mit Hülfe einer Hypothese erklären lassen, je mehr sie durch neue Beobachtungen bestätigt wird, desto mehr Wahrscheinlichkeit gewinnt sie.

Der eben angedeutete Weg, welcher allein zu einer richtigen Erkenntniß der Naturgesetze führen kann, wird mit dem Namen der inductiven Methode bezeichnet.

Allgemeine Eigenschaften der Körper. Da sich die Physik mit Körpern beschäftigt, so ist es vor allen Dingen wichtig, daß man sich eine Vorstellung von dem Wesen dieser Körper bildet, und dazu gelangt man zunächst durch die Betrachtung der allgemeinen Eigenschaften, d. h. derjenigen Eigenschaften, welche wir an allen Körpern beobachten, so verschieden sie auch sonst sein mögen. 4

Jeder Körper besteht aus Stoff oder Materie; die Menge derselben heißt Masse. Zum Wesen eines Körpers gehört ferner, daß er einen begränzten Raum einnimmt, daß er also eine Ausdehnung hat, und daß in demselben Raume nicht zu gleicher Zeit zwei Körper vorhanden sein können, was man mit dem Namen der Undurchdringlichkeit bezeichnet. Außer diesen beiden Eigenschaften, ohne welche die Materie gar nicht denkbar ist, beobachtet man

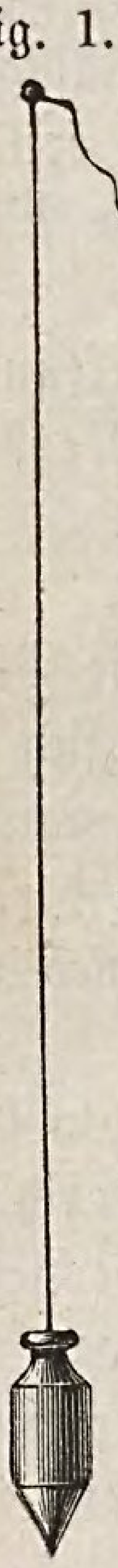
aber noch andere allgemeine Eigenschaften, nämlich Trägheit, Schwere, Theilbarkeit und Veränderlichkeit des Volumens.

5 **Trägheit.** In der ganzen Natur kann keine Veränderung in dem Zustande der Dinge vorgehen, ohne daß sie von einer besonderen Ursache veranlaßt wird; was für Veränderungen also ein Körper auch erleiden mag, seien es nun Veränderungen im Zustande der Ruhe oder der Bewegung, seien es Veränderungen seines Aggregatzustandes u. s. w., immer sind, um Veränderungen hervorzubringen Ursachen nöthig, welche man Kräfte nennt. Ist ein Körper in Ruhe, so ist eine Kraft nöthig, um ihn in Bewegung zu setzen; ist er in Bewegung, so ist eine Kraft nöthig, um ihn in Ruhe zu bringen; ein Körper, der einmal in Bewegung ist, wird seine Bewegung mit unveränderlicher Geschwindigkeit in unveränderter Richtung fortsetzen, bis sie durch äußere Hindernisse aufgehoben wird. Man bezeichnet die eben besprochene Eigenschaft der Körper mit dem Namen der Trägheit oder des Beharrungsvermögens.

Schon im alltäglichen Leben finden wir zahlreiche Erscheinungen, welche sich durch das Gesetz der Trägheit erklären lassen. Das Schwungrad einer Maschine läuft noch eine Weile fort, wenn auch die Kraft, welche die Maschine treibt, zu wirken aufgehört hat; es würde ewig fortlaufen, wenn die Reibung die Bewegung nicht fortwährend verzögerte; dagegen dreht sich die Erde fort und fort mit gleich bleibender Geschwindigkeit um ihre Achse, weil keine Kraft vorhanden ist, welche ihrer Bewegung entgegenwirkt.

6 **Schwere.** Wenn man einen Stein, ein Stück Holz u. s. w. vom Boden entfernt und dann sich selbst überläßt, so fallen diese Körper, bis sie den Boden oder irgend einen anderen Körper treffen, welcher sie aufhält. Da die Materie träge ist, so kann sie nicht von selbst aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung übergehen. Das Fallen der Körper muß also einer Kraft zugeschrieben werden, und diese Kraft nennen wir Schwere.

Fig. 1.



Die Richtung der Schwerkraft ist die des Bleiloths, Fig. 1, d. h. die Richtung eines in seiner Ruhelage befindlichen biegsamen Fadens, an welchen irgend ein schwerer Körper, etwa eine Bleikugel, angehängt ist. Die Richtung des Bleiloths wird auch als die senkrechte oder verticale bezeichnet. Das Bleiloth ist stets gegen den Mittelpunkt der Erde gerichtet.

Die Schwere ist eine allgemeine Eigenschaft der Körper, d. h. sie ist nicht allein eine Eigenschaft der festen Körper, sondern sie kommt auch den Flüssigkeiten und den Gasen zu. Die Schwere der Flüssigkeiten wird schon durch das Fallen der Regentropfen bewiesen; daß aber auch die Gase Schwere besitzen, daß also die ganze Luftmasse, welche unseren Erdball umgiebt, auf die Erdoberfläche drückt, dafür werden wir später noch Beweise finden.

Die Schwere eines Körpers ist das Resultat einer Anziehung, welche die Erdkugel auf denselben ausübt. Diese anziehende Kraft der Erde wirkt aber nicht allein auf alle Körper, welche sich auf ihrer Oberfläche befinden, sie wirkt auch noch über die Erdatmosphäre hinaus bis zum Mond, denn eben die Schwere ist es, welche den Mond in seiner Bahn um die Erde erhält.

In gleicher Weise wird auch die Erde und ebenso werden alle Planeten von der Sonne angezogen.

Diese Anziehung ist aber durchaus gegenseitig. Die Sonne zieht die Erde und die Erde zieht die Sonne an. Daß die Erde um die Sonne kreist, und nicht umgekehrt die Sonne um die Erde, hat nur darin seinen Grund, daß die Masse der Sonne weitaus überwiegend ist.

Jeder Planet wird ferner auch von allen übrigen Planeten angezogen. Daß diese gegenseitige Planetenanziehung die Regelmäßigkeit der Planetenbahnen nur unbedeutend stört, hat darin seinen Grund, daß die Masse der Planeten sehr unbedeutend ist im Vergleich zur Masse der Sonne.

Diese unser ganzes Planetensystem beherrschende gegenseitige Anziehung der Himmelskörper wird mit dem Namen der allgemeinen Schwere oder der Gravitation bezeichnet.

Das Gesetz der allgemeinen Schwere läßt sich kurz so ausdrücken:

Je zwei materielle Körper ziehen einander an, und zwar mit einer Kraft, welche direct proportional ist dem Product der Massen der beiden Körper, und umgekehrt proportional dem Quadrat ihrer Entfernung.

Bezeichnet man daher mit f die Anziehung zweier Masseneinheiten in der Einheit der Entfernung, ferner mit M die Masse des einen, mit m die Masse des anderen, mit r aber die Entfernung der beiden sich anziehenden Körper und endlich mit K die Größe ihrer gegenseitigen Anziehung, so ist:

$$K = f \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}.$$

Das Gravitationsgesetz wurde von Newton (1643 bis 1727) aufgestellt und bewiesen.

Gewicht. Wenn ein Körper durch irgend eine Unterlage am Fallen 7
verhindert ist, so hört deshalb die Wirkung der Schwere nicht auf, sondern äußert sich in diesem Falle durch einen Druck, welcher auf die Unterlage ausgeübt wird; die Größe dieses Druckes wird Gewicht des Körpers genannt. Das Gewicht wächst mit der Anzahl der materiellen Theilchen eines Körpers, also mit seiner Masse. Um das Gewicht verschiedener Körper mit einander zu vergleichen, bedienen wir uns der Wage, deren Anwendung allgemein bekannt ist, deren Einrichtung aber später noch beschrieben werden soll.

In Frankreich und jetzt auch in Deutschland ist das Gramm gesetzlich als Gewichts-Einheit festgesetzt. Das Gramm ist das Gewicht eines

Cubikcentimeters reinen Wassers im Zustande seiner größten Dichtigkeit.

Das französische Gewichtssystem hat den großen Vorzug vor anderen, daß die Einheit des Gewichtes und des Raummaaßes in einer einfachen Beziehung stehen, so daß man leicht vom Volumen auf das Gewicht und umgekehrt schließen kann*), weshalb es für die Behandlung vieler physikalischer Fragen von der größten Bequemlichkeit ist.

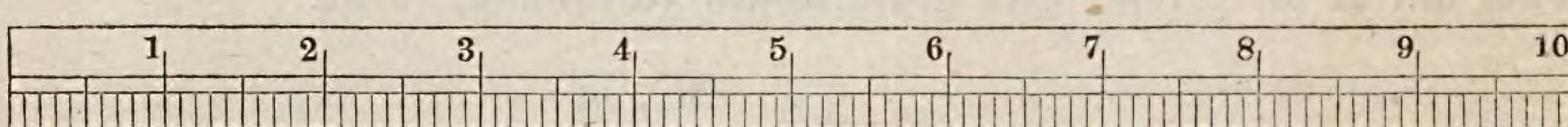
*) Ein Maaß ist nur dann ein- für allemal als unveränderlich bestimmt zu betrachten, wenn es einer unveränderlichen Größe der Natur entnommen ist, und dies ist bei dem neuen französischen Maaßsysteme der Fall. Alle übrigen Maaßsysteme haben erst durch die Vergleichung mit den französischen Maaßen eine feste Bestimmung erhalten.

Die unveränderliche Größe, welcher das französische Längenmaaß zu Grunde liegt, ist der Erdmeridian, d. h. der Umfang eines größten Kreises der Erdkugel, welcher durch die beiden Pole geht. Der 40millionste Theil dieses Umfangs ist ein Meter.

Die Länge eines Erdmeridians wurde durch eine Reihe mit der größten Sorgfalt angestellter Gradmessungen ermittelt, und bei diesen Messungen die ältere französische Längeneinheit, die Toise, zu Grunde gelegt; man erfuhr auf diese Weise also zunächst, wie viel solcher Toisen der Erdmeridian enthalte, und somit war eigentlich schon die Länge der Toise fest bestimmt; da man aber nun ein ganz neues Maaßsystem schaffen wollte, so nahm man den 40millionsten Theil des in Toisen ausgedrückten Erdmeridians zur neuen Längeneinheit, kurz man bestimmte nun genau das Verhältniß des Meters zur Toise.

Das Meter wird in 10 Decimeter, in 100 Centimeter, in 1000 Millimeter eingetheilt; der beigedruckte kleine Maaßstab stellt ein Decimeter mit seinen Unterabtheilungen so genau dar, als es auf diese Weise möglich ist.

Fig. 2.



Das Verhältniß der wichtigsten Längenmaaße zum Meter ist in folgender Tabelle gegeben.

1 rheinländischer oder preußischer Fuß	= 313,85	Millimeter
1 englischer Fuß	= 304,79	„
1 Wiener Fuß	= 316,10	„
1 Pariser Fuß	= 324,84	„
1 Toise = 6 Pariser Fuß	= 1,94904	Meter
1 deutsche oder geographische Meile	= 7407	„
1 englische Seemeile = 1 italienische Meile	= 1852	„

Das gewöhnliche Körpermaaß sowohl wie das Flüssigkeitsmaaß und das Gewicht ist bei dem französischen Maaßsystem vom Längenmaaß abgeleitet. Die Einheit des Flüssigkeitsmaaßes ist das Liter = 1000 Cubikcentimeter.

Ein Cubikcentimeter Wasser wiegt 1 Gramm. 1000 Gramm machen 1 Kilogramm aus. 1 Liter Wasser wiegt also ein Kilogramm.

1 Gramm ist = 10 Decigramm = 100 Centigramm = 1000 Milligramm.

Masse. Die Definition der Masse ist bereits in §. 4 gegeben worden; 8
ein bequemes Mittel, sie zu messen, liefert uns aber erst die Schwere.

Die Masse eines Körpers ist stets seinem Gewichte proportional. Dieser Zusammenhang zwischen Masse und Gewicht wird uns überall durch den Versuch nachgewiesen, obgleich er dem Begriff nach nicht durchaus nöthig ist; d. h. es wäre denkbar, daß es in der Natur Körper gebe, auf welche die Schwere gar nicht wirkt, obgleich sie deshalb nicht aufhören, träge Massen zu sein. Es wäre ferner denkbar, daß die Schwerkraft ungleich auf die Theilchen verschiedener Substanzen wirke, daß eine Bleikugel z. B. nur deshalb schwerer wäre als eine gleich große Kugel von Holz, weil die Anziehungskraft der Erde auf ein Bleistück stärker wirkt als auf ein Holzstück von gleicher Masse. Wäre aber dies wirklich der Fall, so müßte offenbar die viel schwerere Bleikugel schneller fallen, da bei gleichem Widerstande die größere Kraft eine größere Geschwindigkeit hervorbringen muß. Nun aber fällt in der That die Bleikugel nicht schneller als die Holzkugel (wenigstens im leeren Raume), und daraus geht hervor, daß die 12mal größere Kraft, welche die Bleikugel zur Erde zieht, auch eine 12mal so große träge Masse in Bewegung zu setzen hat, daß also die träge Masse der Bleikugel 12mal so groß ist als die Masse der Holzkugel.

Da nun die Fallgeschwindigkeit für alle Körper dieselbe ist (im leeren Raume), so schließen wir auf dieselbe Weise, daß die Masse eines Körpers stets seinem Gewichte proportional ist.

Specifisches Gewicht. Das specifische Gewicht eines Kör- 9
pers ist die Zahl, welche angiebt, wie viel mal ein Körper schwerer ist, als ein gleiches Volumen Wasser. Ein Cubikcentimeter Eisen wiegt 7,8, ein Cubikcentimeter Gold 19,258 Gramm, während ein gleiches Volumen Wasser nur 1 Gramm wiegt; also ist 7,8 das specifische Gewicht des Eisens, 19,258 das specifische Gewicht des Goldes. Man findet allgemein das specifische Gewicht eines Körpers, wenn man sein absolutes Gewicht durch das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser dividirt.

Bezeichnen wir das specifische Gewicht eines Körpers mit S, sein abso-

---

Das Pfundgewicht der verschiedenen Länder ist sehr ungleich, doch ist das Pfund in der Regel ziemlich nahe gleich ½ Kilogramm. Das deutsche Zollpfund und das schweizerische Pfund ist genau ½ Kilogramm.

1 altes preußisches Pfund	= 467,711	Gramm
1 Londoner Pfund (Troy-pound)	= 373,202	„
1 Wiener Pfund (Handelsgewicht)	= 572,880	„
1 altes französisches Pfund	= 489,506	„

Näheres über die Bestimmung des Meters findet man in meiner „Geometrie“, 3. Auflage, Seite 5 u. 6 und Seite 73 bis 77.

lutes Gewicht mit P und das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser mit p, so ist also

$$S = \frac{P}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Die Größen also, welche man durch den Versuch bestimmen muß, um aus denselben das specifische Gewicht eines Körpers zu berechnen, sind das absolute Gewicht desselben und das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser.

Am leichtesten ist es, diese Größen für Flüssigkeiten auszumitteln. Man fülle ein Gefäß, am besten ein solches, welches oben in einen engen Hals mündet, bis zu einer bezeichneten Höhe (bis zu einem am Halse markirten Striche), einmal mit Wasser, dann mit der zu bestimmenden Flüssigkeit, und ermittele jedesmal mit Hülfe der Wage das Gewicht des Flascheninhaltes.

Es wiege z. B. das Vitriolöl, welches einen Glaskolben bis zu einer Marke am Halse ausfüllt, 1534 Gramm, während das Wasser, welches dasselbe Gefäß gleichfalls bis zur Marke füllt, nur 830 Gramm wiegt, so ist das specifische Gewicht des Vitriolöls $\frac{1534}{830} = 1,848$.

Wenn man nicht so große Massen der zu bestimmenden Flüssigkeit hat, wie in dem eben angeführten Beispiele, so kann man geeignete kleinere Gefäße mit engem Halse anwenden, etwa ein solches wie Fig. 3, welches mit einem eingeriebenen Stöpsel versehen ist (Pyknometer).

Fig. 3.



Um das specifische Gewicht fester Substanzen zu bestimmen, kann man aus denselben einen Körper von regulärer Gestalt formen, etwa einen Würfel, eine Kugel u. s. w., so daß es leicht ist, den cubischen Inhalt der zu untersuchenden Stücke zu berechnen. Das absolute Gewicht solcher Körper findet man durch die Wage; das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser ist durch das bekannte Volumen der Körper gegeben. Ein Würfel von Marmor z. B. wiege 21,6 g. Wenn nun jede Seite dieses Würfels 2 cm beträgt, so ist der cubische Inhalt desselben 8 ccm; ein gleich großer Würfel von Wasser wird also 8 g wiegen, folglich ist das specifische Gewicht des Marmors $\frac{21,6}{8} = 2,7$.

Nicht von jeder Substanz hat man solche Massen, um daraus reguläre Körper bilden zu können; außerdem aber ist es ungemein schwierig, ja fast unmöglich, reguläre Körper genau genug zu arbeiten. Man muß deshalb nach anderen Methoden sich umsehen, um das specifische Gewicht fester Körper zu bestimmen. Die meisten dieser Methoden beruhen auf hydrostatischen Gesetzen, welche wir erst später werden kennen lernen.

Ist n das Gewicht der Volumeinheit Wasser und V das Volum des Körpers, so ist das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser $p = V.n$. Es ist also

$$S = \frac{P}{V.n} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Wählt man z. B. für die Raumeinheit den preußischen Cubikfuß, für die Gewichtseinheit das (alte) preußische Pfund, so hat man $n = 66$ zu setzen, weil ein preußischer Cubikfuß Wasser 66 Pfund wiegt.

Wählt man dagegen ein Maaßsystem, bei welchem das Gewicht der Raumeinheit Wasser zur Gewichtseinheit genommen ist, wie das neuere französische, in welchem 1 ccm Wasser 1 g, oder 1 cdm Wasser 1 kg wiegt, so ist $n = 1$ und die Gleichung 2) reducirt sich auf

$$S = \frac{P}{V} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

woraus

$$V = \frac{P}{S} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

und

$$P = VS \quad \ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

Nun ist $P : V$ das Gewicht der Raumeinheit des Körpers; nach Gleichung 3) giebt somit das specifische Gewicht auch das Gewicht der Raumeinheit eines Körpers an; man erfährt also durch dasselbe unmittelbar, wie viel Gramm ein Cubikcentimeter, oder wie viel Kilogramm ein Cubikdecimeter oder Liter eines Körpers wiegt.

Gleichbedeutend mit „specifischem Gewicht“ wird auch oft der Ausdruck „Dichtigkeit“ gebraucht, welcher jedoch eine Hypothese über die Constitution der Materie einschließt, und deshalb leicht Mißverständnisse veranlassen kann.

In den folgenden Tabellen ist das specifische Gewicht verschiedener Substanzen zusammengestellt.

Tabelle

der specifischen Gewichte einiger festen Körper bei 0 Grad.

Platin { gemünzt	22,000	Smaragd	2,775
Platin { geschmolzen	20,857	Bergkrystall	2,683
Gold { gemünzt	19,325	Porzellan 2,49 bis	2,14
Gold { geschmolzen	19,253	Gyps (krystallisirt)	2,311
Iridium	18,600	Schwefel (natürlich)	2,033
Wolfram	17,600	Elfenbein	1,917
Blei, gegossen	11,352	Alabaster	1,874
Palladium	11,300	Anthracit	1,800
Silber	10,474	Phosphor	1,770
Wismuth	9,822	Bernstein	1,078
Kupfer { gehämmert	8,878	Ebenholz	1,226
Kupfer { gegossen	7,788	Eichenholz (alt)	1,170
Kupfer { zu Draht gezogen	8,780	Buxbaum	1,330
Cadmium	8,694	Mahagonyholz	1,060
Molybdän	8,611	Wachs, weißes	0,969
Messing	8,395	Eis	0,910
Arsenik	8,308	Natrium	0,972
Nickel	8,279	Kalium	0,865
Uran	8,100	Lithium	0,590
Stahl	7,816	Ahornholz { frisch	0,904
Kobalt	7,812	Ahornholz { trocken	0,659
Eisen { geschmiedet	7,788	Buchenholz { frisch	0,982
Eisen { gegossen	7,207	Buchenholz { trocken	0,590
Zinn	7,291	Edeltanne { frisch	0,890
Antimon	6,712	Edeltanne { trocken	0,450
Tellur	6,115	Erlenholz { frisch	0,857
Chrom	5,900	Erlenholz { trocken	0,500
Jod	4,948	Eschenholz { frisch	0,904
Schwerspath	4,926	Eschenholz { trocken	0,644
Selen	4,320	Hainbuchenholz { frisch	0,945
Diamant	3,520	Hainbuchenholz { trocken	0,769
Flintglas 3,78 bis	3,20	Lindenholz { frisch	0,817
Flußspath	3,15	Lindenholz { trocken	0,439
Aluminium	2,67	Nußbaumholz	0,677
Flaschenglas	2,600	Cypressenholz	0,598
Spiegelglas	2,370	Cedernholz	0,561
Turmalin (grün)	3,155	Pappelholz	0,383
Marmor	2,837	Kork	0,240

Specifisches Gewicht einiger Flüssigkeiten

(bei 0°, wo nichts weiter bemerkt ist).

Destillirtes Wasser	1,000	50 Proc. Säure	1,265
Quecksilber	13,598	60 „ „	1,348
Brom	2,966	70 „ „	1,398
Schwefelsäure (englische)	1,848	80 „ „	1,438
Verdünnte Schwefelsäure nach		90 „ „	1,473
Delezenne bei 15° C.:		100 „ „	1,500
10 Proc. Säurehydrat	1,066	Schwefelkohlenstoff	1,272
20 „ „	1,138	Glycerin	1,260
30 „ „	1,215	Milch	1,030
40 „ „	1,297	Meerwasser	1,026
50 „ „	1,387	Wein: Malaga-	1,022
60 „ „	1,486	„ Rhein-	0,999
70 „ „	1,595	Oel: Leinöl	0,953
80 „ „	1,709	„ Mohnöl	0,929
90 „ „	1,805	„ Olivenöl	0,915
100 „ „	1,848	„ Terpentinöl	0,872
Verdünnte Salpetersäure:		Benzol	0,868
10 Proc. Säurehydrat	1,054	Alkohol, absoluter	0,793
20 „ „	1,111	Petroleum	0,79 bis 0,82
30 „ „	1,171	Schwefeläther	0,715
40 „ „	1,234	Petroleumäther	0,64 bis 0,66

Der Vollständigkeit wegen folgt hier noch eine Tabelle, welche die specifischen Gewichte einiger Gasarten enthält, obgleich die Methoden zur Bestimmung dieser Zahlen erst später besprochen werden können.

Specifisches Gewicht einiger Gase

(bei 0° und 760 mm Barometerstand).

Atmosphärische Luft	0,001293	Chlor	0,00317
Sauerstoff	0,001432	Kohlensäure	0,00197
Stickstoff	0,001256	Stickoxydgas	0,00134
Wasserstoff	0,000089	Leuchtgas	0,00082

10 **Theilbarkeit.** Alle Körper können mechanisch getheilt, d. h. in kleinere Theilchen zerlegt werden, die mit dem Ganzen gleichartig sind.

Wie weit aber geht die mechanische Theilbarkeit? Kommen wir bei fortgesetzter Verkleinerung wohl zu Theilchen, die noch sinnlich wahrnehmbar, aber doch nicht weiter theilbar sind? So weit unsere Erfahrung reicht, geht die Theilbarkeit stets über die Gränzen der sinnlichen Wahrnehmung hinaus. Als Beispiel außerordentlicher Theilbarkeit führt man gewöhnlich den Moschus an, welcher Jahre lang ein ganzes Zimmer mit einem intensiven Geruch erfüllen kann, ohne merklich an Gewicht abzunehmen.

Obgleich nun die mechanische Theilbarkeit der Körper weit über die Gränzen der sinnlichen Unterscheidung hinausgeht, so nehmen die Physiker doch aus verschiedenen, namentlich der Chemie entnommenen Gründen an, daß dieselbe nicht ins Unendliche fortgehe, sondern daß alle Körper aus kleinen, mechanisch nicht weiter zerlegbaren Theilchen bestehen. Diese Theilchen nennt man Moleküle.

Die Moleküle der Körper, welche zwar mechanisch nicht mehr getheilt werden können, lassen sich ihrer Mehrzahl nach gleichwohl noch in ungleichartige Theilchen zerlegen. Diese letztere Art der Theilung nennt man chemische Zerlegung. Die chemische Zerlegung geht noch mehr als die mechanische Theilbarkeit über die Gränzen der sinnlichen Wahrnehmung hinaus. Der Zinnober z. B. ist aus Quecksilber und Schwefel zusammengesetzt; man ist aber nicht im Stande, die kleinen Theilchen von Schwefel und Quecksilber einzeln für sich zu unterscheiden; selbst durch das beste Mikroskop betrachtet, erscheint der Zinnober doch immer noch als eine vollkommen homogene (gleichartige) Masse. Erhitzt man aber den Zinnober mit gewissen anderen Körpern, so werden dessen Moleküle in Schwefel und Quecksilber zerlegt, welche jedoch selbst wieder nicht weiter chemisch zerlegbar sind. Hieraus folgt, daß die Moleküle noch nicht die kleinsten überhaupt existirenden Theilchen sein können, sondern selbst wieder aus noch kleineren Theilchen zusammengesetzt sein müssen, die weder mechanisch noch chemisch zerlegt werden können. Diese kleinsten Theilchen, aus denen die Moleküle bestehen, werden Atome genannt.

Nach dem Bisherigen bestehen also die Körper aus Molekülen, welche mechanisch nicht getheilt werden können, die Moleküle aber aus Atomen, die weder mechanisch noch chemisch zerlegbar sind. Diese Grundansicht von der Constitution der Körper, welche von Dalton (1766 bis 1844) begründet wurde, wird mit dem Namen der atomistischen Moleculartheorie bezeichnet.

11 **Veränderlichkeit des Volumens.** Eine weitere allgemeine Eigenschaft ist die Ausdehnbarkeit und die damit zusammenhängende Zusammendrückbarkeit. Ein und derselbe Körper nimmt nicht immer genau dasselbe Volumen ein; er kann durch Druck oder Erkaltung verkleinert, durch Spannung und Erwärmung vergrößert werden. Nehmen wir nun an, daß die Moleküle, so lange der Körper chemisch nicht zerlegt wird, unveränderlich sind, so

läßt sich diese Veränderlichkeit des Volumens nur durch die Annahme erklären, daß die Moleküle nicht in unmittelbarer Berührung stehen, sondern durch Zwischenräume getrennt sind, durch deren Vergrößerung oder Verkleinerung das Volumen der Körper zu- oder abnimmt.

Ein weiterer Beweis dafür, daß selbst die kleinsten Theilchen, aus welchen die Körper zusammengesetzt sind, nicht in unmittelbarer Berührung stehen können, ergiebt sich aus der im 5. Buche zu besprechenden mechanischen Wärmetheorie, der zufolge die fühlbare Wärme der Körper aus einer Vibrationsbewegung der kleinsten Theilchen zu erklären ist. Eine solche Vibrationsbewegung wäre unmöglich, wenn die Moleküle nicht durch Zwischenräume getrennt wären.

Porosität. Die Zwischenräume, welche sich zwischen den verschiedenen 12
Theilchen der Körper befinden, nennt man Poren. Bezeichnet man mit diesem Namen auch die Zwischenräume zwischen den Molekülen der Körper, so ist dem eben Gesagten zufolge jeder Körper porös, die Porosität also eine allgemeine Eigenschaft. Im gewöhnlichen Leben versteht man aber unter Poren nur solche Zwischenräume, welche groß genug sind, um Flüssigkeiten und Gase durchzulassen. In diesem Sinne ist die Porosität freilich keine allgemeine Eigenschaft. Ein Schwamm, alle künstlichen Gewebe, Kreide, Bimsstein u. s. w. sind porös im engeren Sinne des Wortes.

Aggregatzustände. Wir beobachten an den Körpern Verschieden- 13
heiten, die nur von der verschiedenen Art und Weise herrühren können, wie die Theilchen verbunden sind, ja ein und derselbe Stoff kann uns in sehr verschiedenen Formen erscheinen, wie das Wasser, welches als Eis fest, als Wasser flüssig, als Dampf aber gasförmig ist; ohne die Zusammensetzung zu ändern, können wir das Wasser in Eis und das Eis in Wasser verwandeln, wir können das Wasser verdampfen und den Dampf wieder zu Wasser verdichten.

Alle Körper, welche wir kennen, befinden sich in einem der drei beim Wasser erwähnten Zustände, sie sind entweder fest, flüssig, oder gasförmig (luftförmig).

Die festen Körper haben, die geringen Veränderungen abgerechnet, welche durch die Wärme hervorgebracht werden, ein unveränderliches Volumen und eine selbstständige Gestalt; ferner gehört eine mehr oder weniger bedeutende Kraft dazu, um einen festen Körper zu zertheilen. Es ist z. B. unmöglich, ein Stück Eisen auf die Hälfte, auf den dritten Theil seines Volumens zusammenzupressen, oder zu machen, daß es den doppelten, dreifachen Raum einnimmt; nur mit großer Gewalt sind wir im Stande, seine Gestalt zu ändern oder es zu theilen.

Die Flüssigkeiten haben in demselben Sinne wie die festen Körper ein unveränderliches Volumen, d. h. wenn wir sie durch einen starken Druck auch ein klein wenig zusammendrücken können, wenn sie sich auch durch Erwärmung etwas ausdehnen, so sind diese Volumveränderungen doch immer nur

sehr unbedeutend; wir können das Wasser, welches eine Flasche ausfüllt, nicht in ein halb so großes Gefäß hineinpressen, und wenn wir es in ein doppelt so großes Gefäß hineingießen, so füllt es dieses nur zur Hälfte aus. Die Flüssigkeiten haben aber keine selbstständige Gestalt, wie die festen Körper, sondern die Gestalt des Raumes, den sie einnehmen, ist von der Form der sie einschließenden festen Körper, also von der Form der Gefäße abhängig; wenn eine Flüssigkeit ein Gefäß nicht ganz ausfüllt, so ist sie oben durch eine horizontale Oberfläche begränzt. Endlich unterscheiden sich die flüssigen Körper von den festen noch dadurch, daß schon die geringste Kraft hinreicht, um ihre Theilchen von einander zu trennen.

Die gasförmigen Körper haben weder eine selbstständige Form noch ein bestimmtes Volumen; der Raum, den sie einnehmen, hängt nur von dem äußeren Druck ab. Man kann eine gegebene Luftmasse leicht auf $^1/_2$, $^1/_4$... $^1/_{10}$ ihres Volumens zusammenpressen, und umgekehrt, wenn sie in einen 2, 4...10mal größeren leeren Raum gebracht wird, so füllt sie auch diesen vollständig aus, wie wir später noch ausführlicher sehen werden; die Gase haben also ein Bestreben, sich so viel wie möglich auszudehnen. Die leichte Theilbarkeit haben sie mit den Flüssigkeiten gemein.

Nach der atomistischen Theorie sind die drei Aggregatzustände in folgender Weise zu erklären:

Bei den festen Körpern befinden sich die Moleküle nicht allein in einer bestimmten Entfernung von einander, sondern auch in einer bestimmten gegenseitigen Lage.

Bei den flüssigen Körpern bleiben die Moleküle zwar auch in bestimmter Entfernung von einander, sie sind aber leicht gegen einander verschiebbar.

Bei den gasförmigen Körpern ist endlich auch der Abstand der Moleküle von einander veränderlich.

Das specifische Gewicht eines Stoffes ändert sich nicht viel, wenn derselbe aus dem festen in den flüssigen Zustand übergeht. Das specifische Gewicht des Wassers ist 1, das des Eises ist nur 0,91. Festes Wachs, festes Stearin haben nur ein unbedeutend größeres specifisches Gewicht als dieselben Stoffe in flüssigem Zustande. Daraus folgt, daß beim Schmelzen eines Stoffes die Entfernung der Moleküle von einander nicht bedeutend geändert wird; wenn dagegen ein fester oder flüssiger Körper in den gasförmigen Zustand übergeht, so ist dies mit einer bedeutenden Vergrößerung des Abstandes der Moleküle von einander verbunden. 1 ccm Wasser liefert 1646 ccm gesättigten Wasserdampf von 100° C. Wenn 1 ccm Wasser in seine gasförmigen Bestandtheile zerlegt wird, so liefert es (unter dem normalen Luftdruck) 621 ccm Sauerstoff- und 1242 ccm Wasserstoffgas.

14 **Verschiedene Natur der Atome.** Bei gleichem Aggregatzustande zeigen aber die Körper noch weitere Verschiedenheiten, die sich nicht aus verschiedenen gegenseitigen Lagerungsverhältnissen der Moleküle erklären

lassen. So sind z. B. Zinnober und Mennige zwei feste Körper von prächtig rother Farbe, die sich äußerlich nicht leicht von einander unterscheiden lassen, und dennoch sind sie in ihren weiteren Eigenschaften sehr verschieden. Wie man auch den Zinnober behandeln mag, man kann ihn nicht in Mennige und die Mennige kann man nicht in Zinnober verwandeln. Wir müssen deshalb annehmen, daß schon die Moleküle des Zinnobers verschieden sind von denen der Mennige.

Die Moleküle der meisten Körper sind nicht aus gleichartigen, sondern aus verschiedenartigen Atomen zusammengesetzt, wenn sie auch ganz gleichartig zu sein scheinen, wie wir dies beim Zinnober schon angeführt haben, dessen Moleküle aus Schwefelatomen und Quecksilberatomen bestehen; so sind auch die Moleküle des Wassers aus Sauerstoff- und Wasserstoffatomen, die des Kochsalzes aus Chlor- und Natriumatomen zusammengesetzt; dagegen bestehen die Moleküle des Schwefels nur aus Schwefelatomen, die des Quecksilbers nur aus Quecksilberatomen; ebenso bestehen auch die Moleküle des Sauerstoffs und Wasserstoffs, des Chlors und Natriums nur aus Sauerstoff- und Wasserstoff-, Chlor- und Natriumatomen. Solche Körper, deren Moleküle aus ungleichartigen Atomen bestehen, heißen *chemisch zusammengesetzte*, im Gegensatz zu denen, deren Moleküle aus gleichartigen Atomen bestehen und sich deshalb nicht weiter in verschiedenartige Bestandtheile zerlegen lassen, und welche man daher auch *einfache Körper*, *Grundstoffe* oder *Elemente* nennt. Man kennt bis jetzt 64 solcher Elemente, d. h. Stoffe, deren Moleküle man bis jetzt wenigstens nicht weiter in verschiedenartige Bestandtheile zu zerlegen im Stande war.

Kräfte und Imponderabilien. Alle Erscheinungen, welche wir 15
in der Natur wahrnehmen, beweisen uns, daß eine beständige Wechselwirkung sowohl zwischen den verschiedenen Körpern als auch zwischen den einzelnen Theilchen eines und desselben Körpers stattfindet.

Die unsichtbaren Ursachen dieser Wechselwirkung nennen wir *Kräfte*.

Die Kräfte können nie Gegenstand einer unmittelbaren Wahrnehmung sein. Die Vorstellungen, die wir uns von diesen Kräften machen, sind immer nur *Hypothesen*, die wir so construiren und modificiren, wie wir sie eben zur Erklärung der Thatsachen bedürfen.

Im Allgemeinen ist in der Physik von Kräften zweierlei Art die Rede, von solchen nämlich, welche in die *Ferne* wirken, wie die Schwere, die magnetischen und elektrischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte u. s. w., und von solchen, welche nur in die *kleinsten Entfernungen* wirken, also nur bei fast unmittelbarer Berührung der Körpertheilchen in Thätigkeit treten und welche deshalb den Namen der *Molekularkräfte* führen. Diese letzteren Kräfte sind es, welchen wir die Erhaltung der verschiedenen Aggregatzustände und der chemischen Verbindungen zuschreiben.

Um die *allgemeine Schwere* zu erklären, muß man annehmen, daß alle Körperatome sich auf die größten Entfernungen hin nach dem bereits in §. 6 besprochenen Gesetze anziehen, und zwar hängt diese Anziehung nur von

den Massen und Entfernungen, aber nicht von der chemischen Natur der Körper ab.

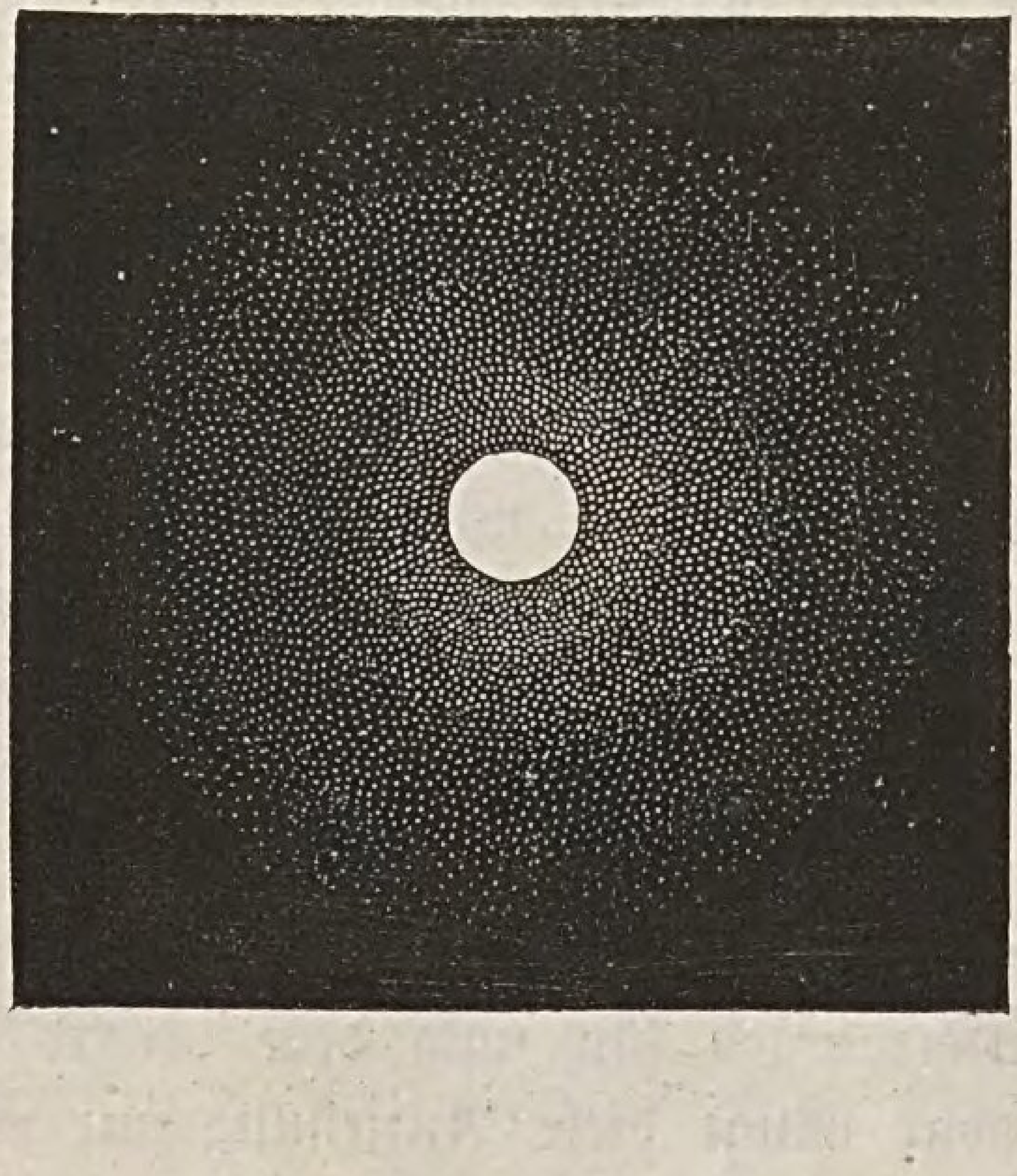
Was nun die Molekularkräfte betrifft, so haben wir anziehende und abstoßende Kräfte zu unterscheiden. Zunächst wirkt zwischen den einzelnen Theilchen eines festen Körpers eine Kraft, welche der Trennung derselben entgegenwirkt und welche man als Cohäsionskraft bezeichnet. Man erklärt die Cohäsionskraft durch die Annahme, daß die Körpermoleküle sich in nächster Nähe mit einer Kraft anziehen, welche schon verschwindend klein wird, wenn die Moleküle sich in der dem gasförmigen Zustande entsprechenden Entfernung befinden. Außerdem unterscheidet sich diese Molekularattraction von der Anziehung, welche die allgemeine Schwere bedingt, dadurch, daß sie von der chemischen Verschiedenheit der Körper abhängt; so ist z. B. die Cohäsion des Eisens bedeutend größer als die des Bleies, die Molekularanziehung der Eisentheilchen muß also auch bedeutend größer sein als die der Bleitheilchen.

Wenn nur die bisher besprochenen Anziehungskräfte thätig wären, so könnte die Körperwelt nicht in der Form bestehen, welche sie wirklich hat, alle Materie müßte sich zu einer großen Masse zusammenballen. Es wird dies nur dadurch verhindert, daß zwischen den Körpertheilchen auch abstoßende Kräfte thätig sind, welche man als Expansionskräfte bezeichnet.

Diese Expansionskräfte sind es, welche der Compression fester und flüssiger Körper entgegenwirken und das Streben der gasförmigen Körper, sich möglichst auszudehnen, bedingen.

Um zu erklären, wie gleichsam von demselben Mittelpunkte aus Anziehung und Abstoßung ausgehen, nimmt man an, daß jedes Körperatom von einer Aetherhülle umgeben ist. Die Aetherhülle besteht aus Aetheratomen, welche man als unendlich viel kleiner annehmen muß als die Körperatome, man hat sich also ein mit seiner Aetheratmosphäre umgebenes Körperatom ungefähr so vorzustellen, wie es Fig. 4 anschaulich macht.

Fig. 4.



Um nun die verschiedenen Zusammenhangsverhältnisse der Körper zu erklären, muß man annehmen,

1) daß die Körperatome und somit auch die Körpermoleküle sich gegenseitig anziehen;

2) daß die Aetheratome sich gegenseitig abstoßen, weshalb sich der Aether durch alle Himmelsräume verbreitet;

3) daß die Körperatome anziehend auf die Aetheratome wirken, weshalb jedes Körperatom, sowie jedes Körpermolekül sich mit einer Aetheratmosphäre umgiebt und die Zwischenräume zwischen den Körperatomen

mit verdichtetem Aether erfüllt sind. Die Anziehung zwischen Körper- und Aetheratomen wirkt aber nicht auf größere Entfernungen, der Aether ist der allgemeinen Schwere nicht unterworfen, er ist imponderabel.

Durch Vibrationsbewegungen der Aetheratome wird die Fortpflanzung des Lichtes und der strahlenden Wärme erklärt, während die fühlbare Wärme als ein Bewegungsphänomen der Körpermoleküle und ihrer Atome aufgefaßt wird. Wir werden auf diesen Gegenstand später, namentlich im Supplementbande, zurückkommen.

Die mechanische Erklärung der Wärmephänomene ist neueren Ursprungs; früher erklärte man sie durch die ruhende Gegenwart eines imponderabeln Fluidums, welches, die Körperatome einhüllend, das repulsive Princip in ähnlicher Weise darstellte, wie man es jetzt von dem Aether annimmt. Die Erwärmung eines Körpers wurde nach dieser Anschauung als eine Vermehrung, die Erkaltung als eine Verminderung des in ihm enthaltenen Wärmefluidums betrachtet.

In ähnlicher Weise nahm man auch die Existenz besonderer imponderabler Fluida zur Erklärung der magnetischen und elektrischen Erscheinungen an, und läßt sich auf diesem Felde bis jetzt wenigstens eine solche Hypothese noch nicht entbehren, obgleich es keinem Zweifel unterliegt, daß es über kurz oder lang gelingen wird, auch die Erklärung der Elektricität und des Magnetismus auf mechanische Principien zurückzuführen.

Erstes Buch.

Mechanik

oder die

Gesetze des Gleichgewichts

und der

Bewegung.

Erstes Capitel.

Gleichgewicht der Kräfte an einfachen Maschinen.

Das Parallelogramm der Kräfte. Sobald auf irgend einen 16
freien Körper, d. h. einen solchen, der sich in jedem Sinne bewegen kann, eine Kraft einwirkt, so wird dieselbe nothwendig seinen Bewegungszustand verändern, wenn nicht gleichzeitig andere Kräfte vorhanden sind, welche die Wirkung jener Kraft aufheben. Ist also der Körper in Ruhe, so wird jede Kraft, die auf ihn wirkt, ihn auch in Bewegung setzen, es sei denn, daß andere auf denselben Körper einwirkende Kräfte diese Bewegung hindern und so den Körper in Ruhe erhalten. In diesem letzteren Falle sagt man, daß die verschiedenen auf den Körper einwirkenden Kräfte sich einander das Gleichgewicht halten.

Hängt man z. B. eine Bleikugel an einem Faden auf, so wird die Wirkung der Schwerkraft, unter deren alleinigen Einfluß die Kugel fallen würde, durch den Widerstand des Fadens aufgehoben.

Die Bedingungen des Gleichgewichts auszumitteln, ist Gegenstand der Statik; die Dynamik dagegen untersucht die Gesetze der Bewegungen, welche entstehen, wenn den Bedingungen des Gleichgewichts nicht genügt ist. Statik und Dynamik zusammengenommen bilden die Mechanik.

An jeder Kraft unterscheidet man:

1) den Angriffspunkt, d. i. der Punkt, auf welchen die Kraft unmittelbar wirkt;

2) die Richtung, in welcher die Kraft den Angriffspunkt zu bewegen sucht; die durch den Angriffspunkt gezogene Gerade, welche die Richtung der Kraft angiebt, heißt auch Angriffslinie;

3) die Größe oder Intensität, welche das Maaß der Kraft ist.

Zwei Kräfte sind einander gleich, wenn sie, nach entgegengesetzten Richtungen auf einen Punkt wirkend, sich das Gleichgewicht halten. Zwei gleiche Kräfte, die nach derselben Richtung wirken, sind der doppelten Kraft gleichzusetzen. Man würde eine dreifache Kraft haben, wenn man drei gleiche Kräfte nach derselben Richtung wirken ließe.

Da die Gewichte der Körper Kräfte sind, welche die Körper gegen den Erdmittelpunkt hin zu bewegen suchen, so kann jede Kraft ihrer Größe nach mit einem Gewichte verglichen und durch dasselbe gemessen werden. Als Einheit der Kraft dient gewöhnlich das Kilogramm. Die Kräfte stellt man bildlich durch Pfeile dar, welche durch ihre Endpunkte die Angriffspunkte, durch ihre Richtung und Länge die Richtung und Größe der Kräfte angeben.

An der Wirkung einer Kraft wird nichts geändert, wenn man die Kraft statt unmittelbar auf den Angriffspunkt auf irgend einen Punkt der Angriffslinie wirken läßt, wenn nur dieser Punkt unveränderlich mit dem ursprünglichen Angriffspunkte verbunden ist. So bleibt die Wirkung einer Kraft, durch welche eine Last fortgezogen werden soll, dieselbe, gleichviel ob man die Kraft unmittelbar an der Last angreifen läßt, oder ob man an die Last ein Seil befestigt und an diesem die Kraft wirken läßt. Ebenso ist der Erfolg der nämliche, wenn auf einen Körper ein Druck ausgeübt werden soll, ob derselbe unmittelbar, oder mittelst eines starren Stabes in der Richtung der Kraft auf den Körper ausgeübt wird.

Wie viele Kräfte auch auf einen materiellen Punkt wirken mögen, welches auch ihre Richtung sein mag, sie werden ihm doch nur eine Bewegung in einer bestimmten Richtung mittheilen. Es läßt sich demnach eine Kraft denken, welche für sich allein dieselbe Wirkung hervorzubringen im Stande ist, welche also das ganze System jener Kräfte ersetzen kann. Sie führt den Namen der **Mittelkraft** oder der **Resultirenden**. Wenn z. B. ein Schiff durch die gleichzeitige Wirkung des Stromes, der Ruder und des Windes getrieben wird, so bewegt es sich nach einer bestimmten Richtung; wenn die Wirkungen des Stromes, der Ruder und des Windes aufhörten, so könnte man doch offenbar dem Schiffe dieselbe Bewegung dadurch wieder ertheilen, daß man an einem Seile, welches am Schiffe befestigt ist, eine bestimmte Kraft nach jener Richtung ziehen ließe. Dies ist die Resultirende der drei Kräfte.

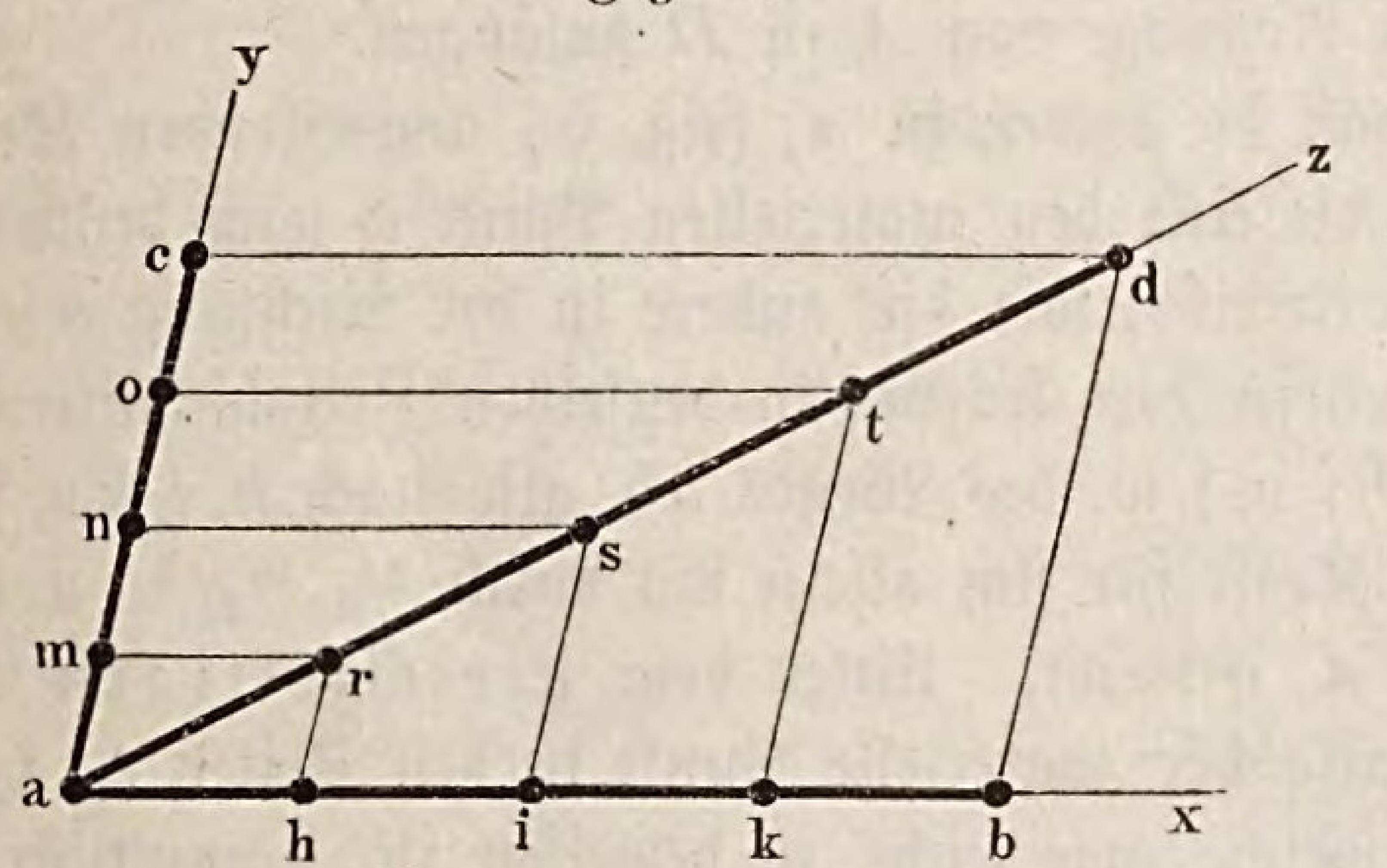
Die Gesammtheit von Kräften, welche auf einen Körper zusammenwirken, nennt man ein **System von Kräften**. In Beziehung auf die **Resultirende**, welche die Gesammtheit der Kräfte ersetzen kann, nennt man diese auch die **Seitenkräfte, Composanten**. Es ist klar, daß zwischen einem System von Kräften, welche auf einen und denselben materiellen Punkt einwirken, **Gleichgewicht stattfinden muß**, wenn jede dieser Kräfte gleich und entgegengesetzt ist der Resultirenden aller übrigen.

Hätte man z. B., um bei dem oben angeführten Beispiele stehen zu bleiben, an einem am Schiffe befestigten Seile eine Kraft wirken lassen, welche der Resultirenden des Stromes, des Windes und der Ruder gleich, aber entgegengesetzt ist, so würde diese neu angebrachte Kraft Gleichgewicht hervorbringen: das Schiff würde stillstehen müssen.

Wenn zwei oder mehrere Kräfte auf einen Punkt **nach derselben Richtung** hin wirken, so ist ihre Resultirende **gleich der Summe** der einzelnen Kräfte. — Wenn dagegen zwei Kräfte in **entgegengesetzter Richtung** auf einen Punkt einwirken, so ist die Resultirende **gleich der Differenz** der beiden und sie wirkt in der Richtung der größeren.

Wenn aber die Richtungen zweier Kräfte, welche auf einen materiellen Punkt wirken, einen Winkel mit einander bilden, so findet man die Resultirende nach einem Gesetze, welches unter dem Namen des Parallelogramms der Kräfte bekannt ist. Man gelangt zu diesem Gesetze durch folgende einfache Betrachtung.

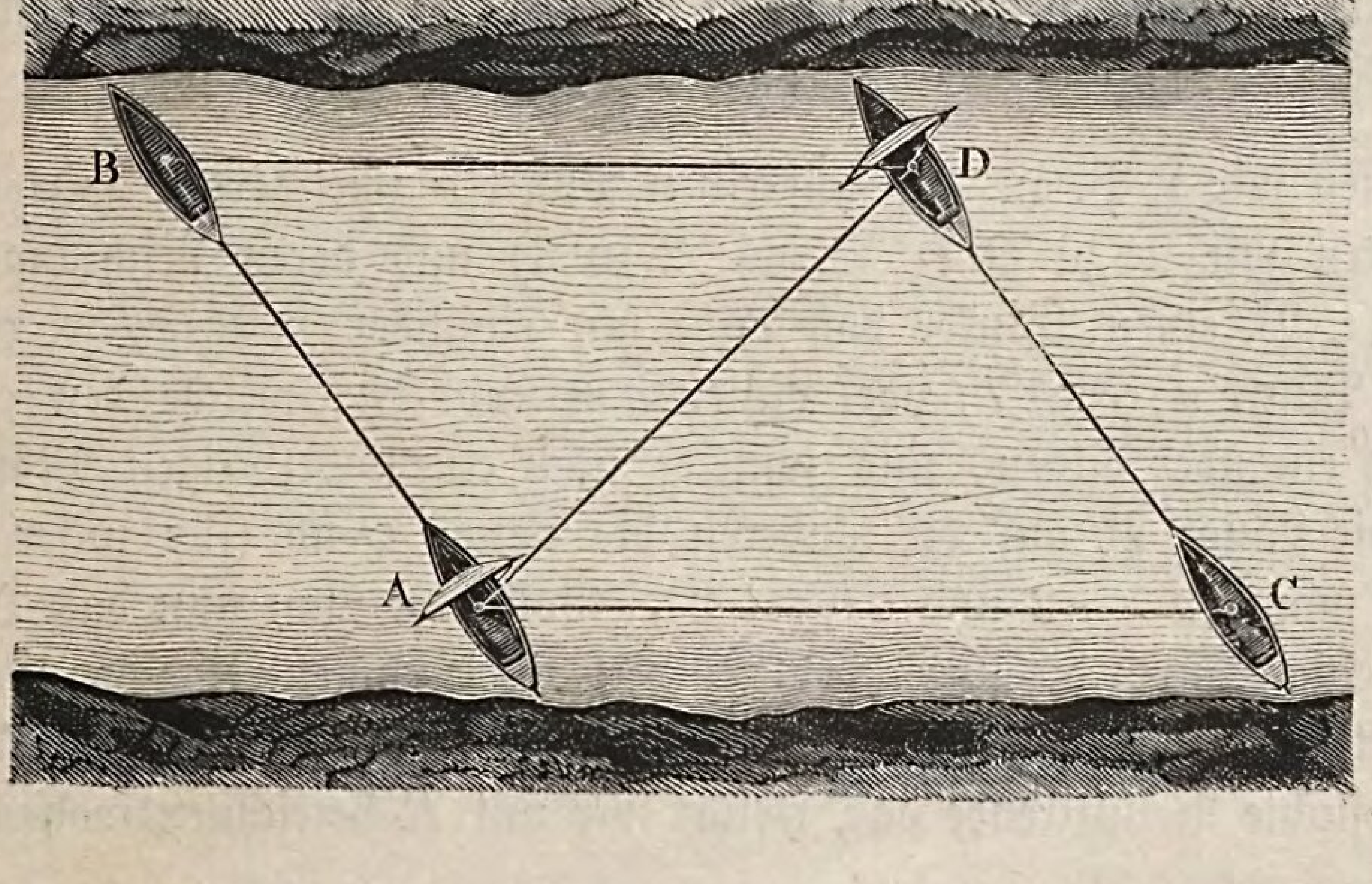
Fig. 5.



Auf den Punkt a, Fig. 5, sollen zwei Kräfte gleichzeitig einwirken, die eine nach der Richtung ax, die andere nach der Richtung ay. Die eine Kraft mag von der Art sein, daß sie für sich allein in einem bestimmten Zeittheilchen, etwa einer Secunde, den Punkt von a nach b bewegen würde, während die andere für sich allein in einer gleichen Zeit ihn von a nach c treibt. Jede dieser beiden Kräfte thut ihre Wirkung vollständig; wenn also der Punkt eine Secunde lang der gleichzeitigen Einwirkung beider Kräfte ausgesetzt ist, so ist der Erfolg offenbar derselbe, als ob eine Secunde lang der Punkt nur der Einwirkung der einen, in der folgenden Secunde aber nur der Einwirkung der anderen Kraft unterworfen wäre. Die erste Kraft allein treibt den Punkt in einer Secunde von a nach b. Hörte nun in dem Moment, in welchem er in b ankommt, alle Wirkung dieser Kraft auf, während der Punkt von nun an nur der Einwirkung der zweiten Kraft folgt, so würde er in der folgenden Secunde den Weg bd (gleich und parallel ac) zurücklegen, also am Ende der zweiten Secunde in d anlangen. In demselben Punkte d muß also auch der Punkt a nach einer Secunde ankommen, wenn beide Kräfte gleichzeitig wirken.

Ein Beispiel wird es anschaulicher machen. Von dem Punkte A, Fig. 6, an dem Ufer eines Flusses, fährt ein Schiff ab, auf welches gleichzeitig zwei

Fig. 6.



Kräfte, der Strom und der Wind, einwirken. Nehmen wir an, das Schiff werde durch den Wind allein in einer bestimmten Zeit, etwa in einer Viertelstunde, quer über den Fluß von *A* nach *B* getrieben, durch den Strom allein aber würde es, wenn gar kein Wind ginge, in derselben Zeit von *A* nach *C* gelangen, so muß es, wenn Strom und Wind gleichzeitig auf dasselbe wirken, eine Viertelstunde nach seinem Abgange von *A* in *D* anlangen.

Nehmen wir nun an, daß die beiden in *a*, Fig. 5, angreifenden Kräfte gleichartig sind, d. h. daß die eine den materiellen Punkt *a* nach demselben Gesetze in der Richtung *ax* forttreibt, wie die andere in der Richtung *ay*, so wird die eine Kraft für sich allein den Körper in denselben Zeitabschnitten t_1, t_2, t_3 u. s. w. durch $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$ u. s. w. des Weges *ab*, also nach *h, i, k* u. s. w. führen, in welchen die andere Kraft für sich allein ihn durch $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$ u. s. w. des Weges *ac*, also nach *m*, *n*, *o* treibt. Unter dem gleichzeitigen Einflusse beider Kräfte wird also der materielle Punkt in den Zeiten t_1, t_2, t_3 von *a* nach *r*, *s*, *t* getrieben, welche, wie leicht zu beweisen ist, sämmtlich auf der geraden Linie *ad* liegen. Kurz: die Resultirende zweier (gleichartiger) Kräfte, welche gleichzeitig unter irgend einem Winkel auf einen materiellen Punkt einwirken, ist von der Art, daß sie den Punkt durch die Diagonale des Parallelogramms zu bewegen strebt, das man aus den Bahnen construiren kann, welche den Seitenkräften entsprechen.

Da die Bahn, welche ein Körper in einer gegebenen Zeit durchläuft, der Kraft proportional ist, welche ihn treibt; da es sich ferner bei Bestimmung der Resultirenden nur darum handelt, ihre Richtung und ihr Größenverhältniß zu den beiden Seitenkräften zu ermitteln: so ergiebt sich folgendes Verfahren, um durch Construction die Resultirende zweier auf einen Punkt wirkender Kräfte zu finden, deren Größe und Richtung gegeben ist:

„Man ziehe durch den Angriffspunkt zwei gerade Linien in der Richtung der gegebenen Seitenkräfte und schneide auf jeder derselben eine der entsprechenden Kraft proportionale Länge ab, alsdann stellt die Diagonale des Parallelogramms, welches durch diese beiden Linien bestimmt ist, sowohl der Größe als auch der Richtung nach die Resultirende der beiden Kräfte dar."

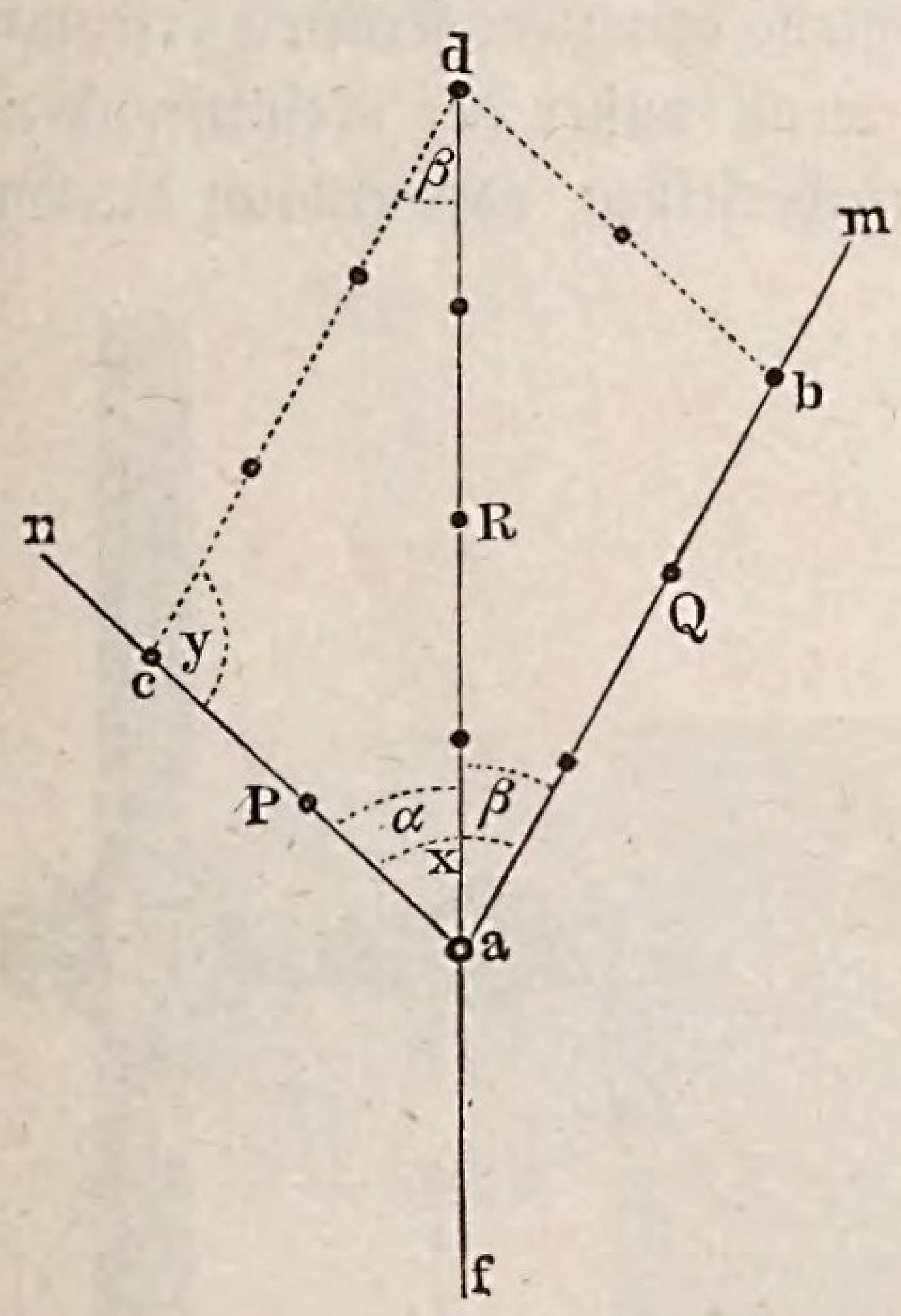
Nehmen wir z. B. an, daß auf einen Punkt *a* zwei Kräfte wirken, welche sich verhalten wie *P* zu *Q* (z. B. wie 2 zu 3) und deren Richtungen einen Winkel *x* (z. B. einen Winkel von 75^0) mit einander machen, so ziehe man durch den Punkt *a*, Fig. 7, zwei Linien *am* und *an*, welche den gegebenen Winkel mit einander bilden, und schneide nach einem beliebigen Maßstab auf der einen die Länge *P*, auf der anderen die Länge *Q* ab (für unser Beispiel also mache man $ac = 2$ und $ab = 3$). Vollendet man nun das Parallelogramm, welches durch die unter dem Winkel *x* zusammentreffenden Linien *ab* und *ac* bestimmt ist, so stellt dessen Diagonale *da* der Größe und Richtung nach die gesuchte Resultirende dar, welche wir mit *R* bezeichnen wollen.

In unserem Beispiel ergiebt sich $R = 4$.

Die Berechnung der Resultirenden ist im Supplementband besprochen.

Bringt man in dem Punkte a eine Kraft an, welche der Resultirenden der beiden Seitenkräfte gleich und entgegengesetzt ist, welche also von a aus in der Richtung af, Fig. 7, wirkt, so muß zwischen den beiden Seitenkräften P und Q und der nach der Richtung af wirkenden Kraft R Gleichgewicht stattfinden.

Fig. 7.



Man kann dies benutzen, um das Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte einer experimentellen Prüfung zu unterwerfen, wie dies in Fig. 8 (a. f. S.) angedeutet ist. Wenn das Gewicht $P = 200$ g, $Q = 300$ g und der Winkel gok gleich 75⁰ ist, so findet Gleichgewicht Statt, wenn $R = 400$ g ist.

Die Resultirende R, Fig. 7, macht mit der Seitenkraft P einen Winkel α, mit Q einen Winkel β. Es ist aber $\alpha > \beta$, wenn $Q > P$; denn da in jedem Dreieck der größeren Seite auch der größere Winkel gegenübersteht*), so muß im Dreieck cda $\alpha > \beta$ sein, wenn $cd > ca$. Die Resultirende theilt also den Winkel x, welchen die beiden Seitenkräfte mit einander machen, so, daß derjenige Winkel der kleinere ist, welchen sie mit der größeren Seitenkraft macht.

Wenn die beiden Seitenkräfte gleich sind, so wird der Winkel, den sie mit einander bilden, durch die Resultirende halbirt.

Mit Hülfe der durch Fig. 7 erläuterten Construction läßt sich leicht nachweisen, daß die Resultirende zweier Kräfte P und Q größer wird, wenn der Winkel abnimmt, welchen diese Seitenkräfte mit einander machen.

Für $x = 0$ wird: $R = P + Q$.

Für $x = 180$ wird: $R = Q - P$,

also $R = 0$, wenn $P = Q$. Bei Gleichheit der Seitenkräfte P und Q wird die Resultirende R verhältnißmäßig sehr klein, wenn der Winkel x nur wenig von 180^0 abweicht (das Knie, siehe im Supplementband).

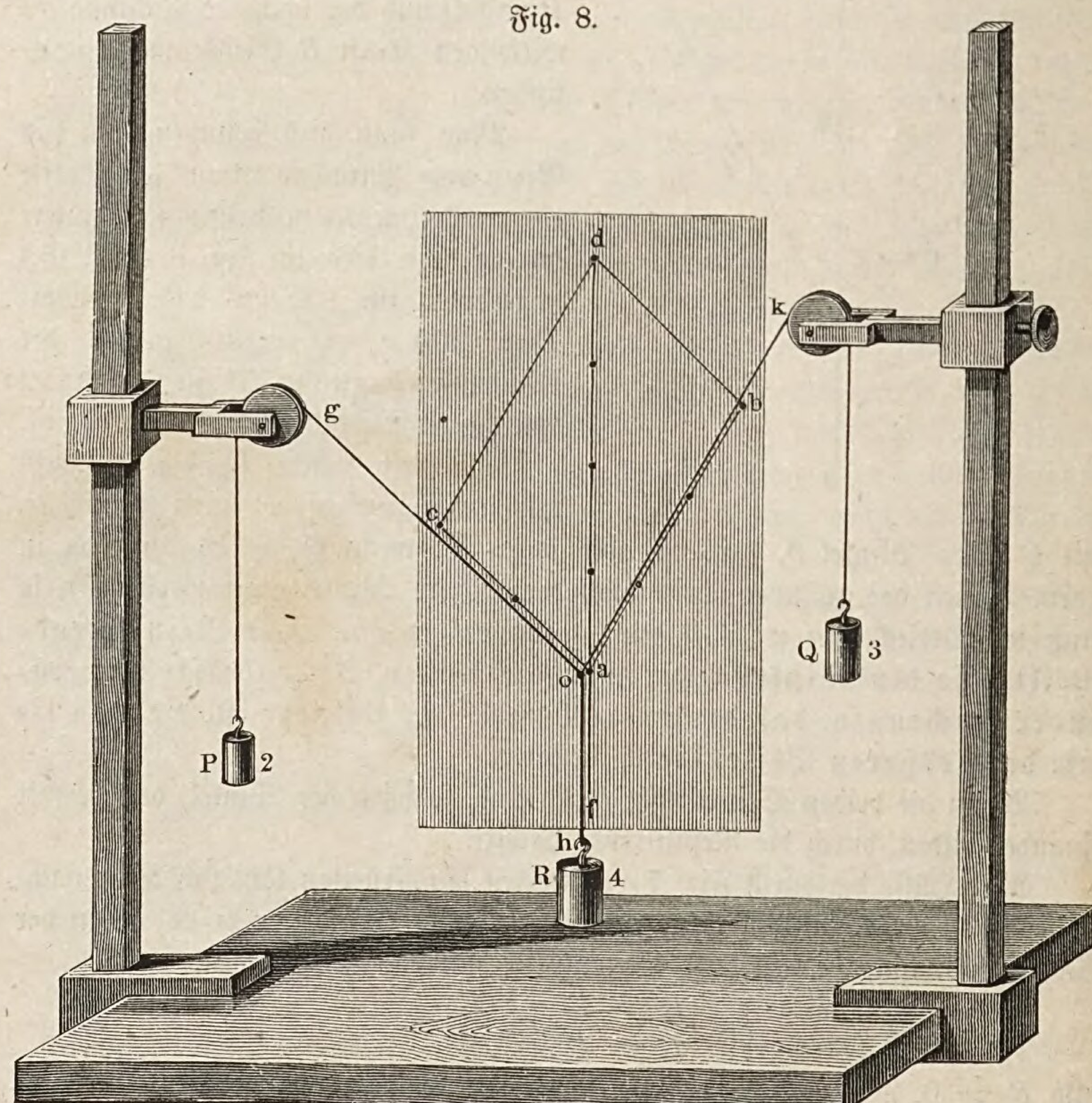
Da man die Resultirende zweier Kräfte, die auf einen Punkt wirken, finden kann, so findet man auch leicht die Resultirende einer beliebigen Anzahl von Kräften; man sucht nämlich nur die Resultirende der beiden ersten Kräfte, alsdann sucht man die Resultirende der eben gefundenen mit der dritten Kraft, verbindet diese Resultirende wieder mit der vierten Kraft u. s. w.

---

*) Siehe meine „Elemente der ebenen Geometrie und Stereometrie", 3. Aufl. Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn. 1869. Seite 25.

Weil zwei Kräfte durch eine einzige ersetzt werden können, so kann man umgekehrt **für eine Kraft auch zwei andere substituiren.** Man sieht ferner auch leicht ein, daß unzählig viele verschiedene Systeme zweier Kräfte dieselbe Resultirende haben können, daß also auch umgekehrt eine Kraft auf unzählig viel verschiedene Arten durch ein System von zwei Kräften ersetzt werden kann. Die Aufgabe ist erst bestimmt, wenn außer der Resultirenden die Größe beider Seitenkräfte, oder die Richtungen derselben, oder endlich die Größe

Fig. 8.



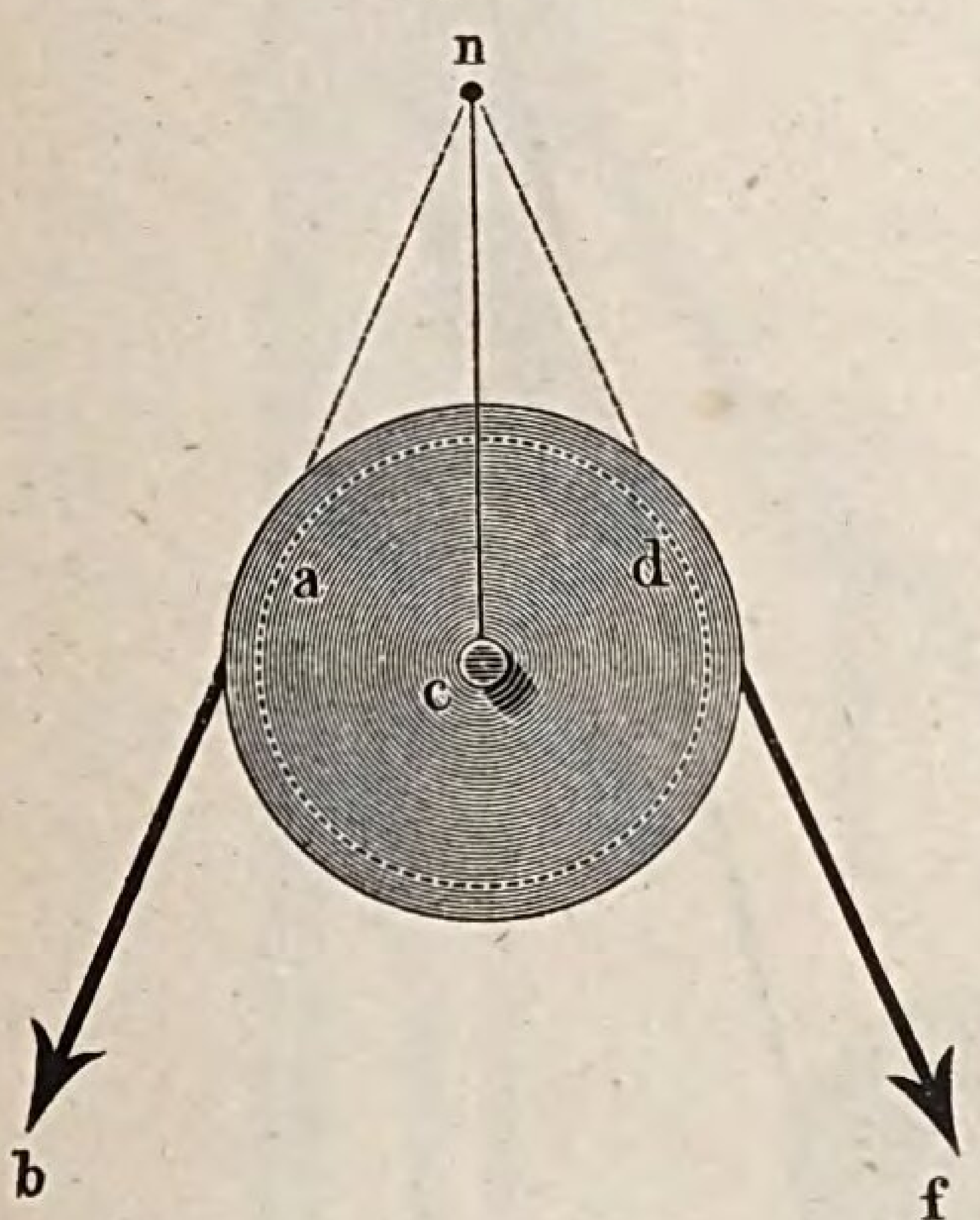
und Richtung der einen gegeben ist; denn in allen diesen Fällen sind die nöthigen Bestimmungsstücke zur Construction des Parallelogramms gegeben. Das Auffinden der Resultirenden aus den Seitenkräften wird **Zusammensetzung**, das Auffinden der Seitenkräfte aus der Resultirenden **Zerlegung** der Kräfte genannt.

Aus dem Satze vom Parallelogramm der Kräfte, welcher von **Galiläi** aufgestellt und bewiesen wurde, lassen sich die Gesetze des Gleichgewichts an allen sogenannten einfachen Maschinen ableiten, die wir jetzt der Reihe nach betrachten wollen.

Rolle und Flaschenzug. Die Rolle ist eine runde, am Rande 17
mit einer ringförmigen Rinne versehene Scheibe, welche um eine durch ihren Mittelpunkt gehende, auf ihrer Ebene rechtwinklig stehende Axe drehbar ist; diese Axe ist gewöhnlich durch eine Scheere getragen, deren Arme zu beiden Seiten der Rolle bis etwas über ihre Mitte reichen, wie man dies Fig. 10 (a. f. S.) sieht.

Man unterscheidet feste und bewegliche Rollen. Feste Rollen sind solche, deren Axe unbeweglich ist, wie die Axe der Rolle A, Fig. 10, so daß keine Verrückung derselben, sondern nur eine Drehung um dieselbe möglich ist, während bei beweglichen Rollen, wie bei B Fig. 10, auch eine Ortsveränderung der Axe möglich ist.

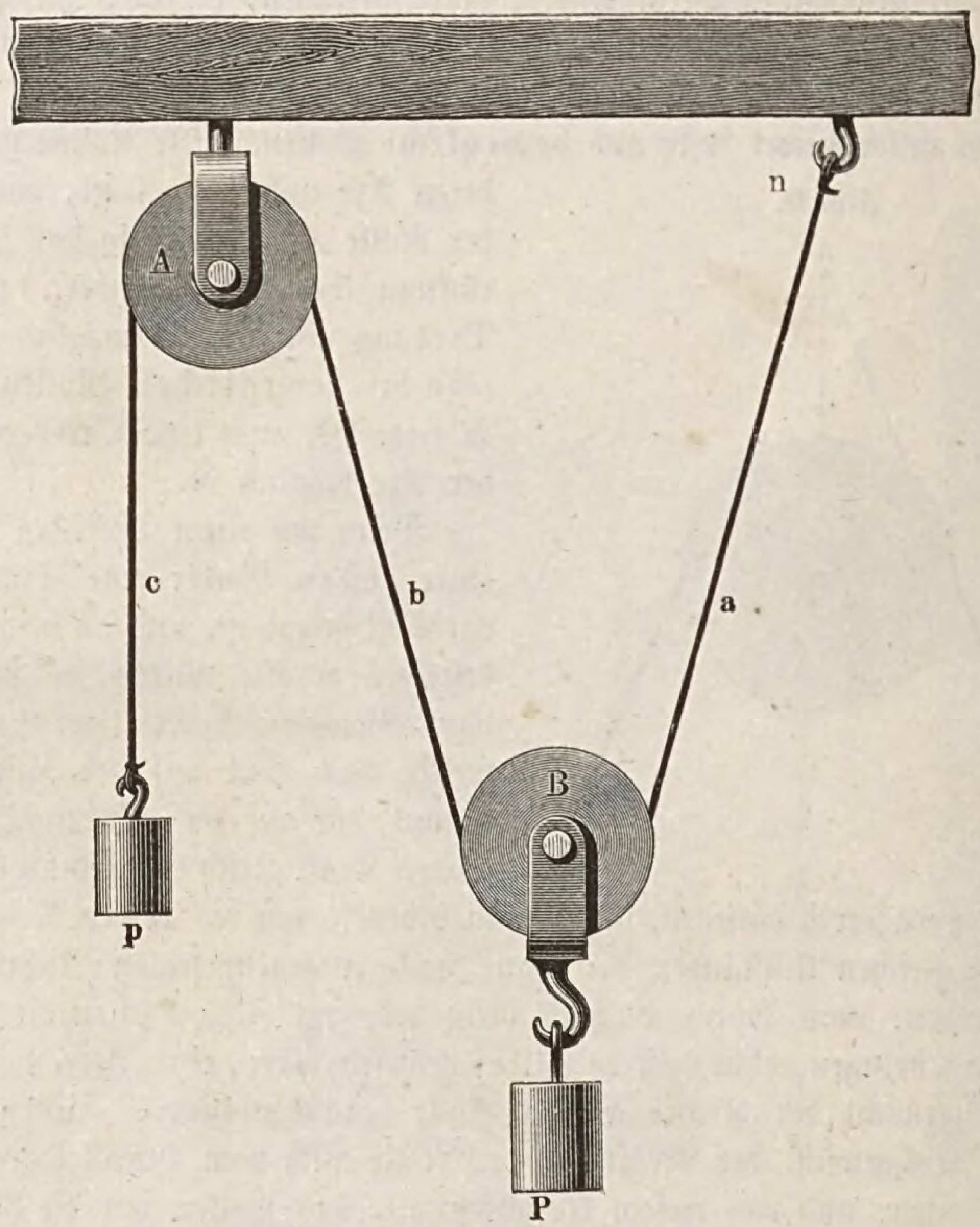
Fig. 9.



Wenn um einen Theil des Umfangs einer festen Rolle eine Schnur oder ein Seil gelegt ist, und an beiden Enden desselben Kräfte wirken, so findet nur dann Gleichgewicht Statt, wenn die Kraft, welche das Seil auf der einen Seite spannt, der auf der anderen Seite wirkenden Kraft gleich ist. Es läßt sich dies leicht von vornherein einsehen, wenn man bedenkt, daß die beiden Kräfte unter sonst ganz gleichen Umständen die Rolle nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen streben: man konnte deshalb beim Apparat Fig. 8 schon die Rolle in Anwendung bringen, ohne daß es nöthig gewesen wäre, eine Betrachtung über das Gleichgewicht der Kräfte an der Rolle vorauszuschicken. Uebrigens läßt sich das Gleichgewicht der Kräfte an der Rolle auch vom Parallelogramm der Kräfte ableiten, und von diesem Gesichtspunkte aus wollen wir die Rolle hier näher betrachten. Fig. 9 stellt eine um ihren festen Mittelpunkt c drehbare Rolle dar; das um dieselbe geschlungene Seil sei durch Kräfte gespannt, welche nach den Richtungen ab und df wirken. Denken wir uns die Linien df und ab bis zu ihrem Durchschnittspunkte n verlängert, so ist klar, daß, wenn n ein mit der Rolle fest verbundener Punkt wäre, man, ohne in der Wirkung etwas zu ändern, die Angriffspunkte der beiden Kräfte von a und d nach n verlegen könnte, und so hätte man dann zwei in einem Punkte n angreifende Kräfte, die nur dann im Gleichgewicht sein können, wenn ihrer Resultirenden das Gleichgewicht gehalten wird. Wenn die beiden in n angreifenden, nach den Richtungen nb und nf wirkenden Kräfte gleich sind, so wird ihre Resultirende den Winkel bnf halbiren; die Richtung dieser Resultirenden geht alsdann durch den festen Mittelpunkt c, und mithin findet Gleichgewicht Statt. Wäre eine der beiden Kräfte größer als die andere, so würde die Resultirende nicht mehr durch diesen festen Punkt gehen, es könnte also auch kein Gleichgewicht mehr stattfinden.

Der Druck, den die Axe der Rolle auszuhalten hat, ist offenbar der Resultirenden der beiden Kräfte gleich, und wenn die Richtungen der beiden Kräfte

Fig. 10.



parallel sind, so ist der Druck auf die Axe gleich der Summe der beiden Kräfte (wozu noch das Gewicht der Rolle selbst zu rechnen ist).

Auch an einer beweglichen Rolle kann nur dann Gleichgewicht stattfinden, wenn die beiden Stücke *a* und *b*, Fig. 10, des um die Rolle geschlungenen Seiles gleich stark gespannt sind, denn nur in diesem Falle geht ihre Resultirende durch den Mittelpunkt der Scheibe; die Wirkung dieser Resultirenden wird aber hier nicht dadurch aufgehoben, daß der Mittelpunkt der Rolle fest ist, sondern dadurch, daß in diesem Mittelpunkte eine dritte Kraft *P* wirkt, welche an einem Haken der Scheere hängt.

Wenn die beiden Enden des um die bewegliche Rolle geschlungenen Seils einander parallel sind, so ist klar, daß die Kraft, mit welcher jedes Seilende gespannt wird, halb so groß ist als die Last, welche an der Scheere hängt.

Wenn zwei oder mehrere Rollen in einem Gehäuse sich befinden, wenn sie also gleichsam eine gemeinschaftliche Scheere haben, so nennt man eine solche Zusammensetzung eine Flasche. Wenn zwei Flaschen, von denen die eine fest,

Fig. 11.

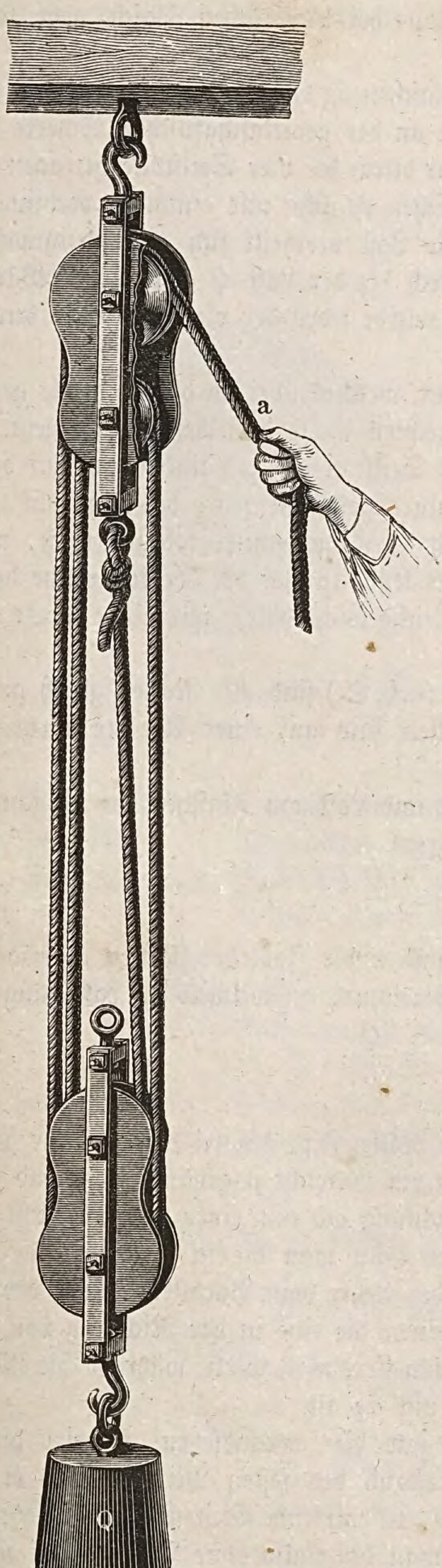
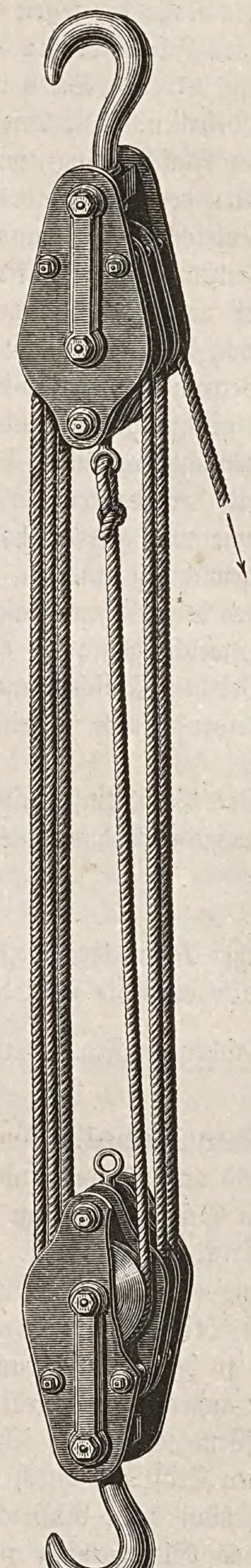


Fig. 12.



die andere beweglich ist, durch ein Seil so verbunden werden, daß es abwechselnd von einer Rolle der festen auf eine Rolle der beweglichen Flasche geht, so erhält man einen Flaschenzug.

Fig. 11 (a. v. S.) stellt einen Flaschenzug dar, dessen Flaschen aus je zwei Rollen bestehen. Die Last Q, welche an der gemeinschaftlichen Scheere der beweglichen Flasche hängt, wird offenbar durch die vier Seilstücke getragen, welche die Rollen der festen und der beweglichen Flasche mit einander verbinden und überall gleich stark gespannt sind; die Last vertheilt sich also gleichmäßig auf vier Seilstücke, folglich ist jedes durch $^1/_4$ der Last Q gespannt. Wäre z. B. eine Last von 100 kg angehängt, so würde jedes der vier Seilstücke durch eine Kraft von 25 kg gespannt sein.

Betrachten wir nun das Seilstück, welches über die oberste Rolle der festen Flasche geschlungen ist und auf der rechten Seite derselben frei ausgeht. Soll Gleichgewicht stattfinden, so muß das Seilstück auf der linken und auf der rechten Seite der obersten Rolle gleich stark gespannt sein; das Seilstück links ist aber, wie wir gesehen haben, durch $^1/_4\ Q$ gespannt; folglich muß, um das Gleichgewicht zu erhalten, an dem Seilende (außer der Kraft, welche dem Gewicht der beweglichen Flasche das Gleichgewicht hält), mit einer Kraft gezogen werden, welche gleich $^1/_4\ Q$ ist.

Bei dem Flaschenzuge Fig. 12 (a. v. S.) sind alle Rollen gleich groß und die zu einer Flasche vereinigten Rollen sind auf einer Axe nebeneinander gestellt.

Das Verhältniß zwischen Kraft und Last am Flaschenzuge ist ganz allgemein ausgedrückt durch die Gleichung:

$$P = \frac{Q}{n},$$

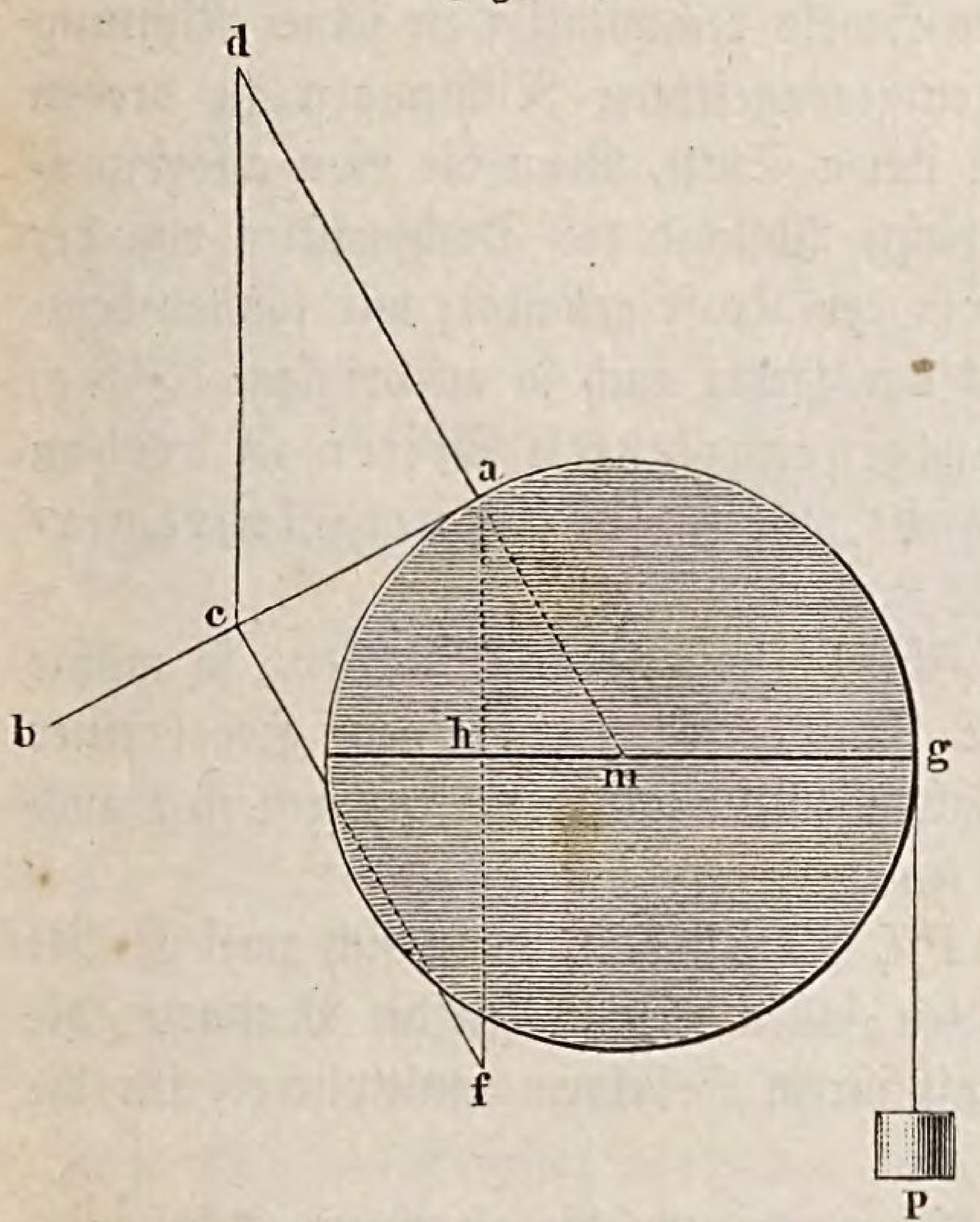
in welcher P die Kraft, Q die Last und n die Zahl der Rollen in beiden Flaschen, also auch die Zahl der Seile bezeichnet, an welchen die Last hängt. Für den Flaschenzug Fig. 12 ist also $P = \frac{Q}{6}$.

18 **Der Hebel.** Um eine feste Rolle, Fig. 13, sei eine Schnur geschlungen, und an das eine Ende derselben ein Gewicht p gehängt, während auf der anderen Seite die Schnur in der Richtung ab mit einer dem Gewicht p gleichen Kraft gespannt ist. Nun aber kann man die in a angreifende, in der Richtung ab wirkende Kraft nach der Lehre vom Parallelogramm der Kräfte in zwei Seitenkräfte zerlegen, von denen die eine in der Richtung von a nach d, also in der Verlängerung des Halbmessers ma, wirkt, während die Richtung af der anderen Seitenkraft parallel mit gp ist.

Wenn die Rolle fest ist, wie wir hier voraussetzen, so wird die Wirkung der Kraft ad durch den Widerstand des festen Mittelpunktes m aufgehoben; man kann demnach die nach ad wirkende Seitenkraft ganz weglassen, ohne das Gleichgewicht zu stören, man kann also ohne Weiteres die nach ab wirkende Kraft durch ihre nach af wirkende Seitenkraft ersetzen.

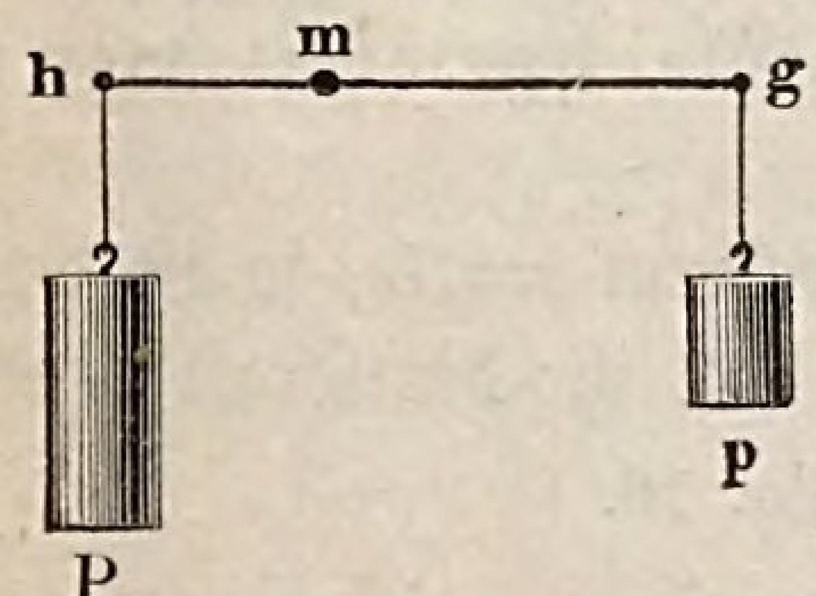
Stellen wir durch die Länge ac die nach ab wirkende Kraft p dar, so ist die Linie af die Größe der Seitenkraft P, und ohne vor der Hand das Größenverhältniß zwischen ac und af oder p und P genauer zu ermitteln, sieht man doch leicht ein, daß P größer sein muß als p. Wir können also die in der Richtung ab wirkende Kraft p durch eine andere ebenfalls in a angreifende, aber in verticaler Richtung wirkende größere Kraft P ersetzen, ohne das Gleichgewicht zu stören.

Fig. 13.



Anstatt die Kraft P in a angreifen zu lassen, kann man, ohne das Gleichgewicht zu stören, ihren Angriffspunkt in jeden beliebigen Punkt der Angriffslinie af verlegen, da alle Punkte der Linie af mit dem Punkte a unveränderlich verbunden sind; wir können also auch die Kraft P im Punkte h angreifen lassen, welcher auf dem Durchschnitte der Linie af mit der Verlängerung des Halbmessers gm liegt, und somit haben wir zwei an den Enden einer um m, Fig. 14, drehbaren geraden Linie hg wirkende, rechtwinklig zu hg angreifende Kräfte, p und P, welche sich das Gleichgewicht halten. Diese beiden Kräfte sind ungleich, ihre Angriffspunkte h und g liegen aber auch in ungleichen Entfernungen vom Drehpunkte m.

Fig. 14.



Es ist jetzt zu ermitteln, welches Verhältniß zwischen den Größen der Kräfte p und P und den Längen hm und gm besteht.

Die Dreiecke caf und ahm, Fig. 13, sind einander ähnlich und daraus folgt:

$$ac : af = hm : am.$$

Nun aber verhalten sich die Längen ac und af wie die Kräfte p und P, wir haben also:

$$p : P = hm : am,$$

und da $am = gm$, so ist:

$$p : P = hm : gm,$$

oder:

$$p : P = L : l \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

wenn wir die Länge $hm = L$ und $gm = l$ setzen. Das heißt in Worten, die Kräfte P und p verhalten sich umgekehrt wie die Entfernungen ihrer Angriffspunkte vom Drehpunkte m.

Eine gerade unbiegsame Linie, welche um einen festen Punkt drehbar ist, wird ein Hebel und der Punkt, um welchen derselbe gedreht werden kann, Drehpunkt, Unterstützungspunkt oder Hypomochlion genannt. Wenn nun in zwei verschiedenen Punkten eines Hebels rechtwinklig zu seiner Richtung zwei Kräfte angreifen, die ihn nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen streben, so findet Gleichgewicht zwischen ihnen Statt, wenn die eben ausgesprochene Bedingung erfüllt ist. Der senkrechte Abstand des Drehpunktes von der Richtung der Kraft wird der Hebelarm der Kraft genannt; wir können demnach die Bedingung des Gleichgewichts am Hebel auch so ausdrücken: Zwei Kräfte, welche den Hebel nach entgegengesetzten Seiten zu drehen suchen, halten sich das Gleichgewicht, wenn sie sich umgekehrt verhalten wie ihre Hebelarme.

Wäre z. B. der Hebelarm hm in Fig. 14 halb so groß als gm, so müßte P doppelt so groß sein als p. Eine Kraft p kann an einem Hebel einer 100fachen Last P das Gleichgewicht halten, wenn nur der Hebelarm mg auch 100mal so groß ist als der Hebelarm hm.

Aus der Proportion bei 1) folgt $PL = pl$, d. h. wenn sich zwei Kräfte an einem Hebel das Gleichgewicht halten sollen, so müssen die Producte, die man erhält, wenn man jede Kraft mit ihrem Hebelarm multiplicirt, für die beiden Kräfte einander gleich sein.

Das Product, welches man erhält, wenn man die an einem Hebel wirkende Kraft mit ihrem Hebelarm multiplicirt, wird das statische Moment der Kraft genannt. Daher läßt sich der obige Satz auch noch in folgende Fassung bringen: Zwei Kräfte, welche den Hebel nach entgegengesetzten Seiten zu drehen suchen, halten sich das Gleichgewicht, wenn ihre statischen Momente einander gleich sind.

In Fig. 15 sei die Kraft rechts $= 6$, ihr Hebelarm $= 5$, so ist das statische Moment dieser Kraft gleich $5 \times 6 = 30$; soll ihr die Kraft links

Fig. 15.

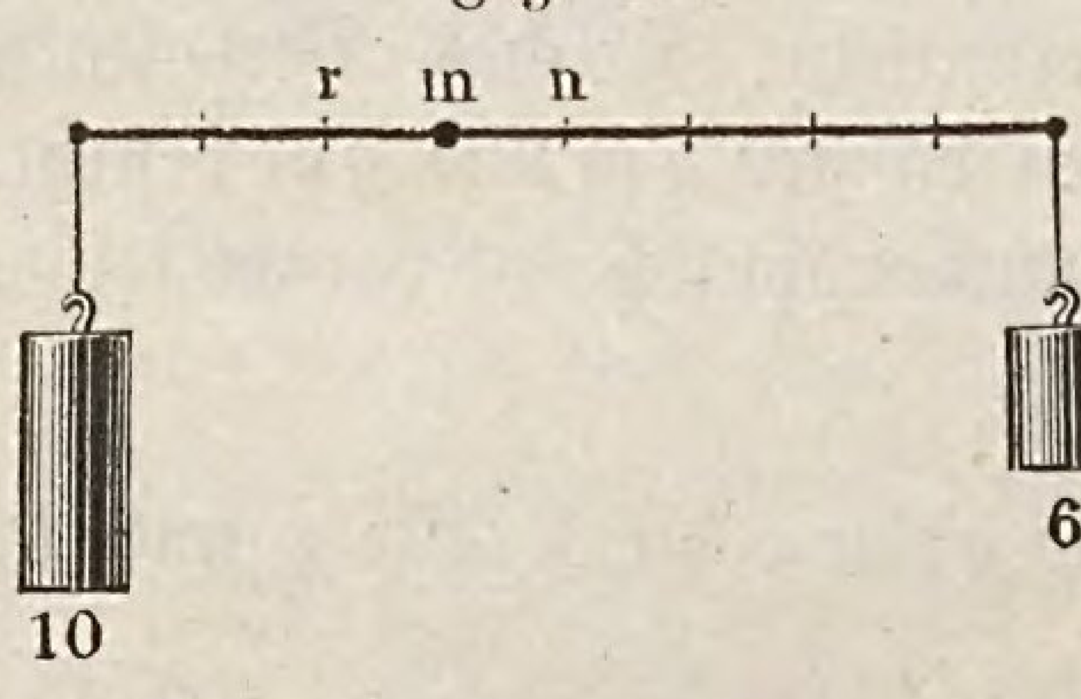
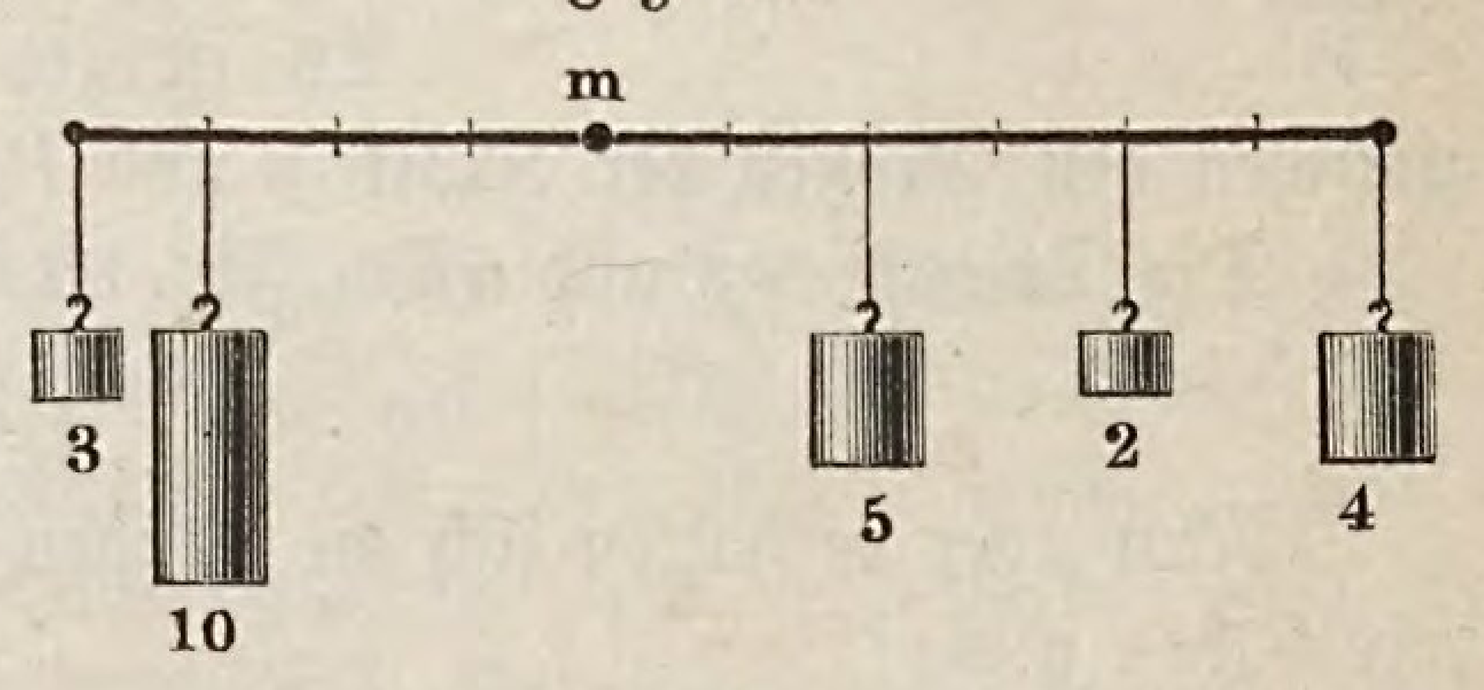


Fig. 16.

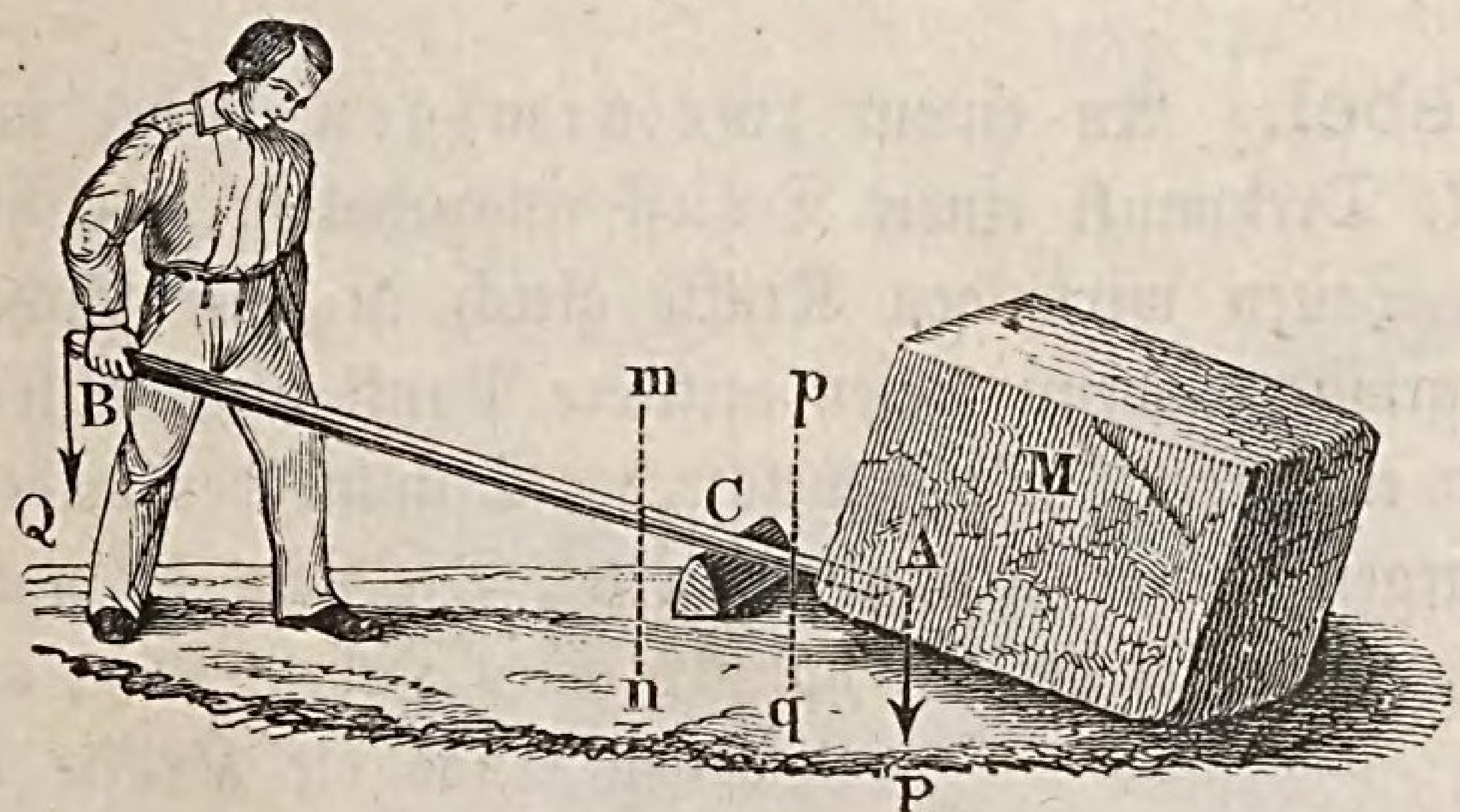


das Gleichgewicht halten, so muß auch ihr statisches Moment gleich 30 sein; die an dem Hebelarme 3 auf der linken Seite wirkende Kraft muß also den Werth 10 haben. Anstatt die Kraft 6 an dem Hebelarme 5 wirken zu lassen, könnte man auch, ohne das Gleichgewicht zu stören, die Kraft 30 im Punkte n, also an dem Hebelarme 1 anbringen.

Wenn auf jeder Seite des Drehpunktes nicht eine, sondern mehrere Kräfte wirken, so findet Gleichgewicht Statt, wenn die Summe der statischen Momente der nach der einen Seite drehenden Kräfte gleich ist der Summe der statischen

Momente der nach der anderen Seite drehenden, wie dies bei dem Fig. 16 dargestellten Beispiele der Fall ist, wo die Summe der statischen Momente auf der rechten Seite 5 . 2 + 2 . 4 + 4 . 6 = 42, für die linke Seite aber 10 . 3 + 3 . 4, also ebenfalls 42 ist.

Fig. 17.

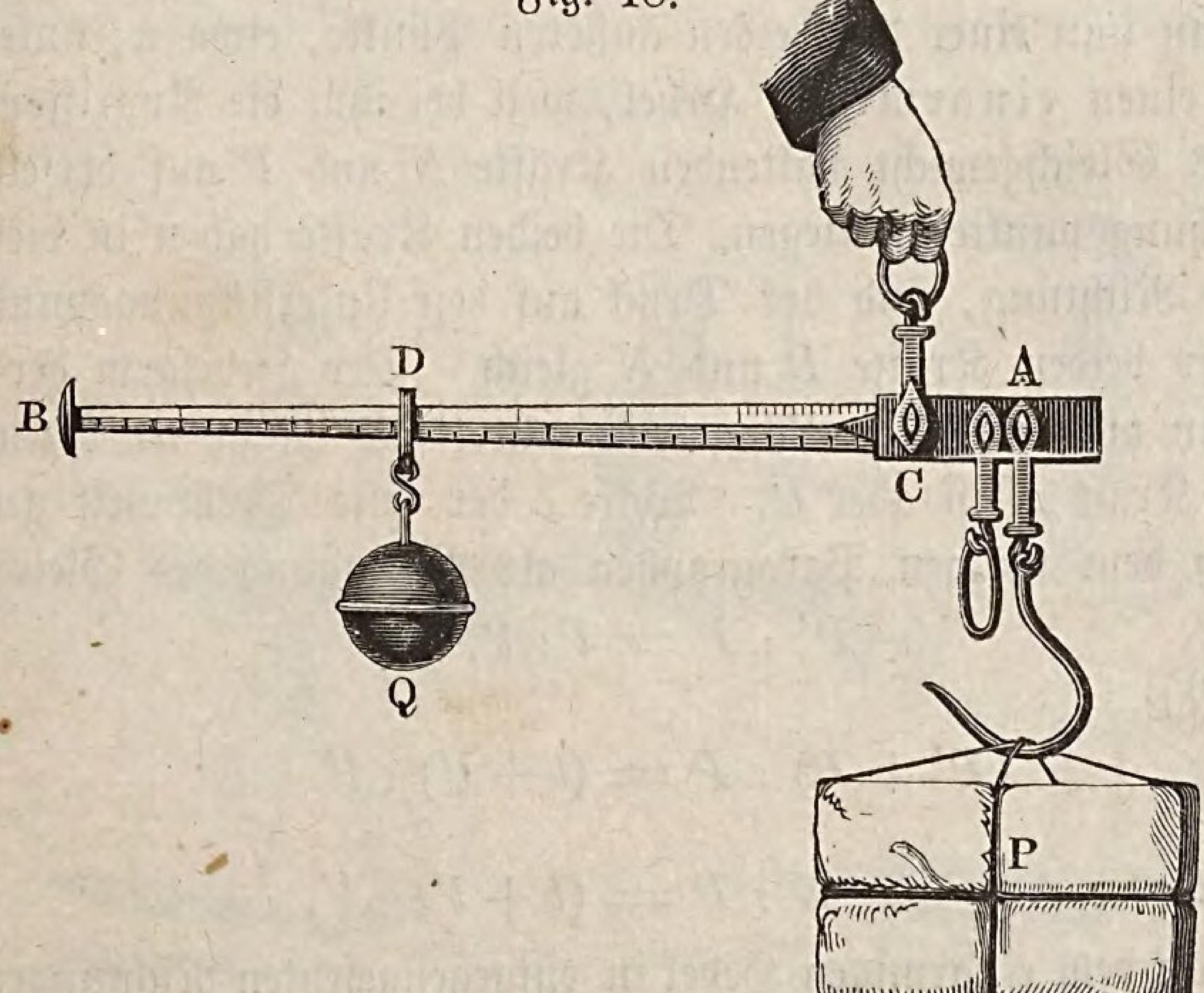


Es ist bisher vom Hebel nur als von einer starren gewichtlosen Linie die Rede gewesen. Ein solcher idealer oder mathematischer Hebel ist aber nur ein Gegenstand der Abstraction, man kann einen solchen nicht herstellen, mit einem solchen nicht experimentiren. Die in Wirklichkeit anwendbaren Hebel sind schwere Stangen oder Stäbe von Holz, Metall und werden deshalb physische oder materielle Hebel genannt. Die Wirkung der Kräfte, welche den materiellen Hebel zu drehen streben, folgt ganz den eben besprochenen Hebelgesetzen. Bei einem materiellen Hebel muß man aber außer den an ihm angreifenden Kräften noch das Gewicht des materiellen Hebels selbst in Rechnung bringen.

Man unterscheidet ferner noch zweiarmige und einarmige Hebel. Zweiarmige Hebel sind solche, bei denen, wie bei den bisher betrachteten, die Angriffspunkte der beiden sich das Gleichgewicht haltenden Kräfte zu beiden Seiten des Drehpunktes liegen, während bei den einarmigen die Angriffspunkte der Kräfte sich auf derselben Seite des Drehpunktes befinden.

Fig. 17 erläutert eine allgemein verbreitete Art der Anwendung des zweiarmigen Hebels. Ein anderes Beispiel liefert uns die gewöhnliche Schnellwage Fig. 18. Ein zweiarmiger Hebel ist bei *C* drehbar, bei *A* ist die Last *P*

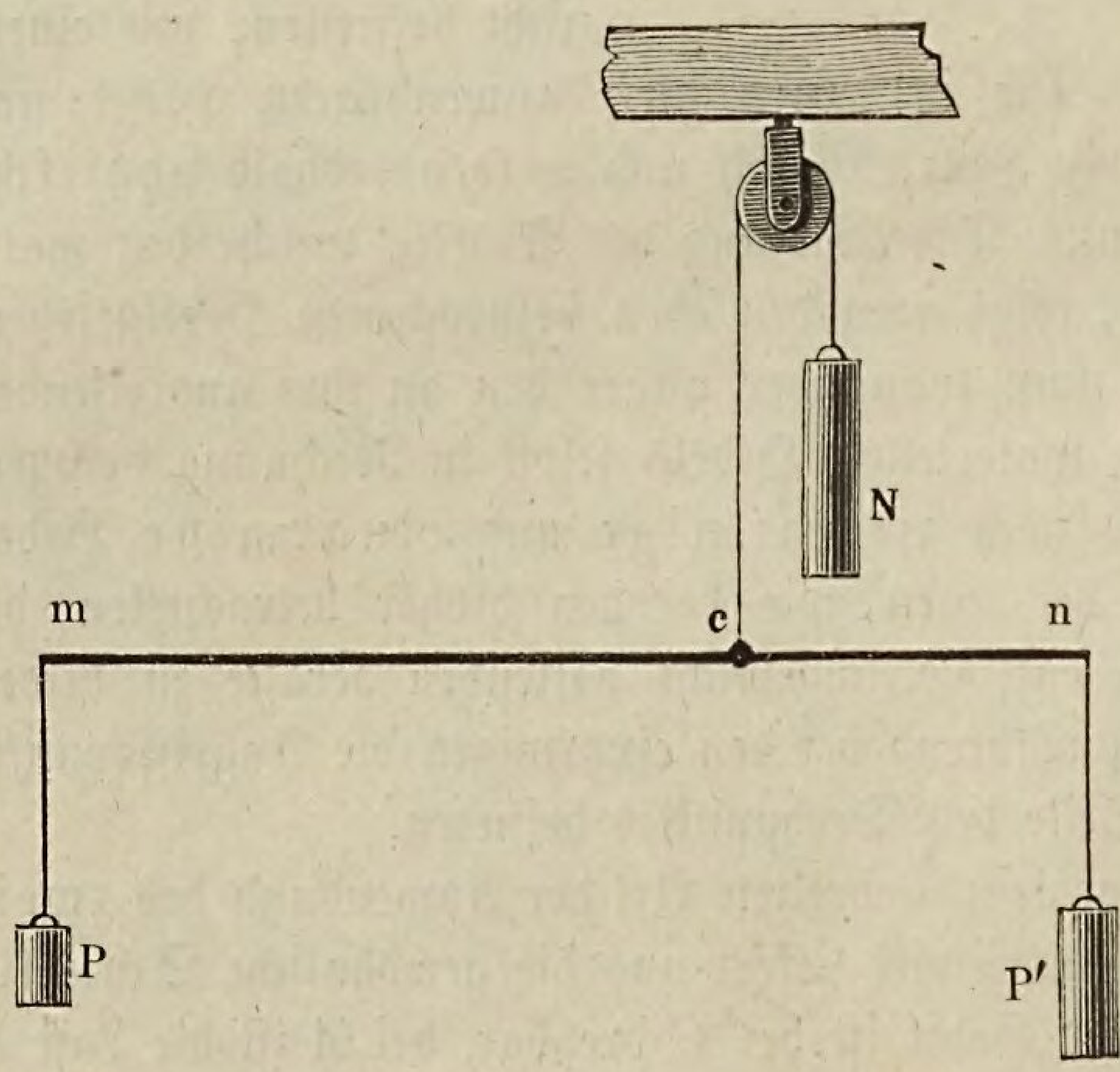
Fig. 18.



angehängt, die also an dem Hebelarme AC wirkt; dieser Last nun wird durch ein am anderen Arme des Hebels angehängtes Laufgewicht Q das Gleichgewicht gehalten. Je größer die Last wird, desto mehr muß man das Laufgewicht Q vom Drehpunkte C entfernen.

19 **Der einarmige Hebel.** An einem zweiarmigen Hebel mit parallelen Kräften hat der feste Drehpunkt einen Druck auszuhalten, welcher der Summe der an beiden Seiten wirkenden Kräfte gleich ist; ein solcher Hebel ist aber auch im Gleichgewichte, wenn dieser mittlere Punkt nicht unterstützt ist, sondern wenn in ihm eine Kraft wirkt, welche der Summe der beiden anderen gleich ist, und in entgegengesetzter Richtung wirkt. Die Fig. 19 mag dies erläutern. Nehmen wir an, c sei der Drehpunkt eines Hebels mn, an dessen Ende die Kräfte P und P' angreifen und sich einander das Gleichgewicht halten. Dieses Gleichgewicht wird nun nicht gestört, wenn der Punkt c frei ist, dagegen in ihm eine Kraft N angebracht wird, welche der Summe von P und P' gleich ist, die aber nach oben wirkt, während die Kräfte P und P' nach unten ziehen.

Fig. 19.



Ohne das Gleichgewicht zu stören, kann man nun wieder jeden der drei Punkte m, c und n als unterstützt betrachten; wenn nun einer der beiden äußeren Punkte, etwa n, unterstützt ist, so haben wir einen einarmigen Hebel, weil bei ihm die Angriffspunkte der beiden sich das Gleichgewicht haltenden Kräfte N und P auf derselben Seite des festen Drehungspunktes n liegen. Die beiden Kräfte haben in diesem Falle entgegengesetzte Richtung, und der Druck auf den Unterstützungspunkt ist dem Unterschiede der beiden Kräfte P und N gleich. Der Hebelarm der Kraft P ist $l + l'$, wenn man mit l die Länge mc, mit l' die Länge nc bezeichnet; der Hebelarm der Kraft N ist aber l'. Wäre c der feste Drehpunkt gewesen, so hätte man nach dem vorigen Paragraphen als Bedingung des Gleichgewichts:

$$P' : P = l : l',$$

und daraus folgt:

$$(P' + P) : P = (l + l') : l'$$

oder

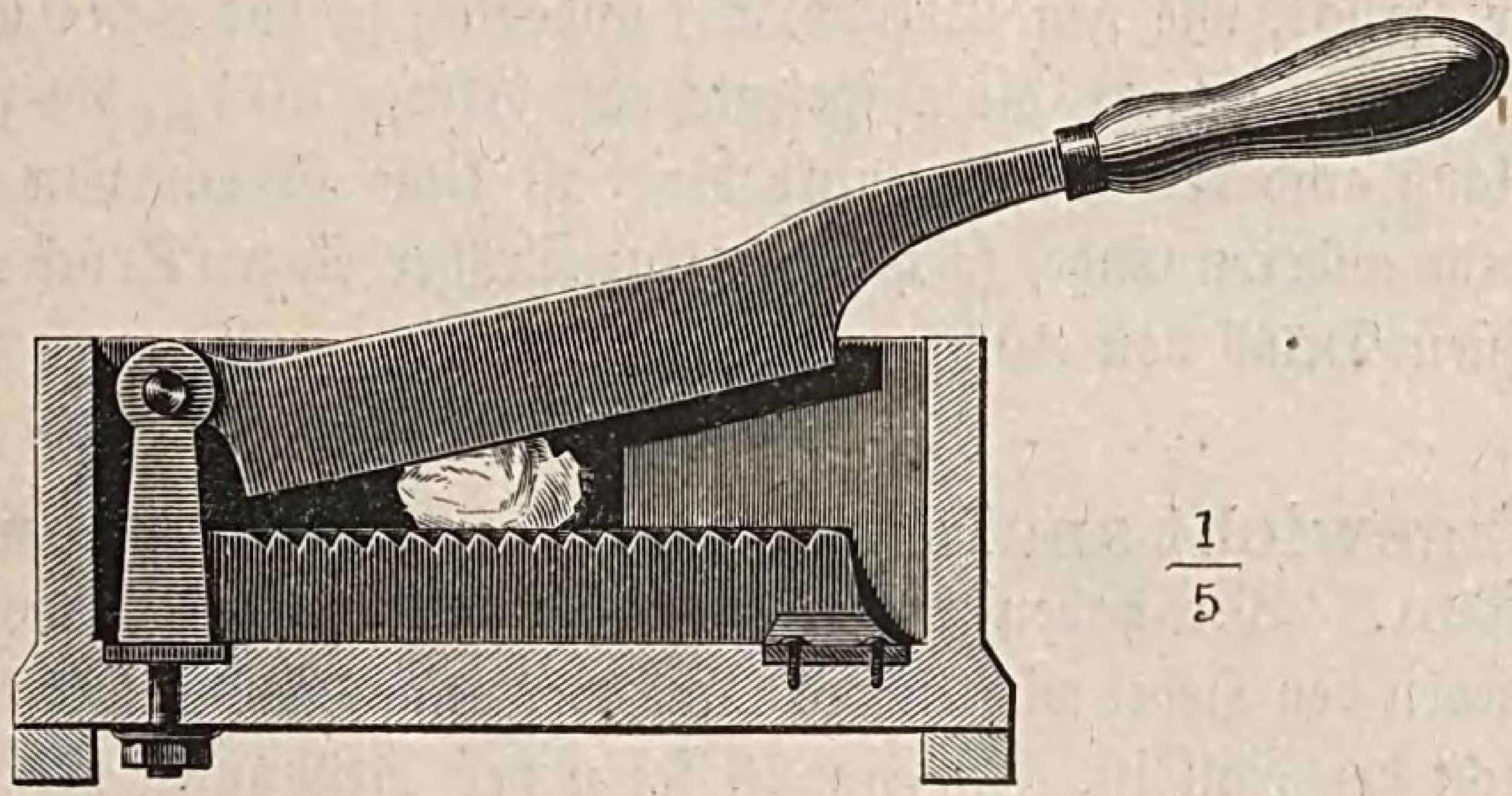
$$N : P = (l + l') : l'.$$

Wenn also die an dem einarmigen Hebel in entgegengesetzten Richtungen wirken-

den Kräfte N und P sich das Gleichgewicht halten sollen, so müssen sie sich ebenfalls umgekehrt verhalten wie ihre Hebelarme.

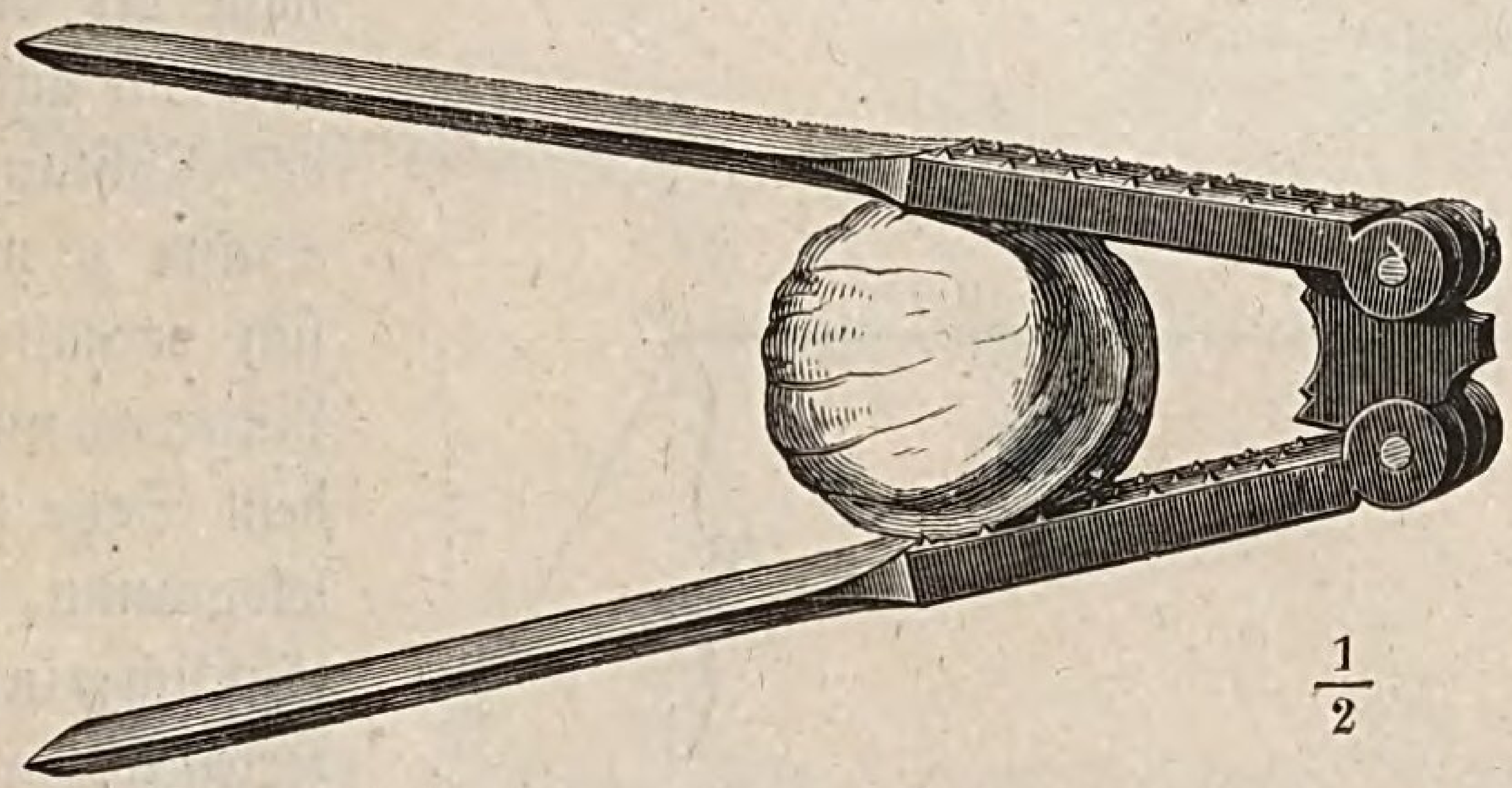
Die Figuren 20 und 21 zeigen zwei bekannte Formen der Anwendung des einarmigen Hebels, welche wohl keiner weiteren Erläuterung bedürfen.

Fig. 20.



$\frac{1}{5}$

Fig. 21.

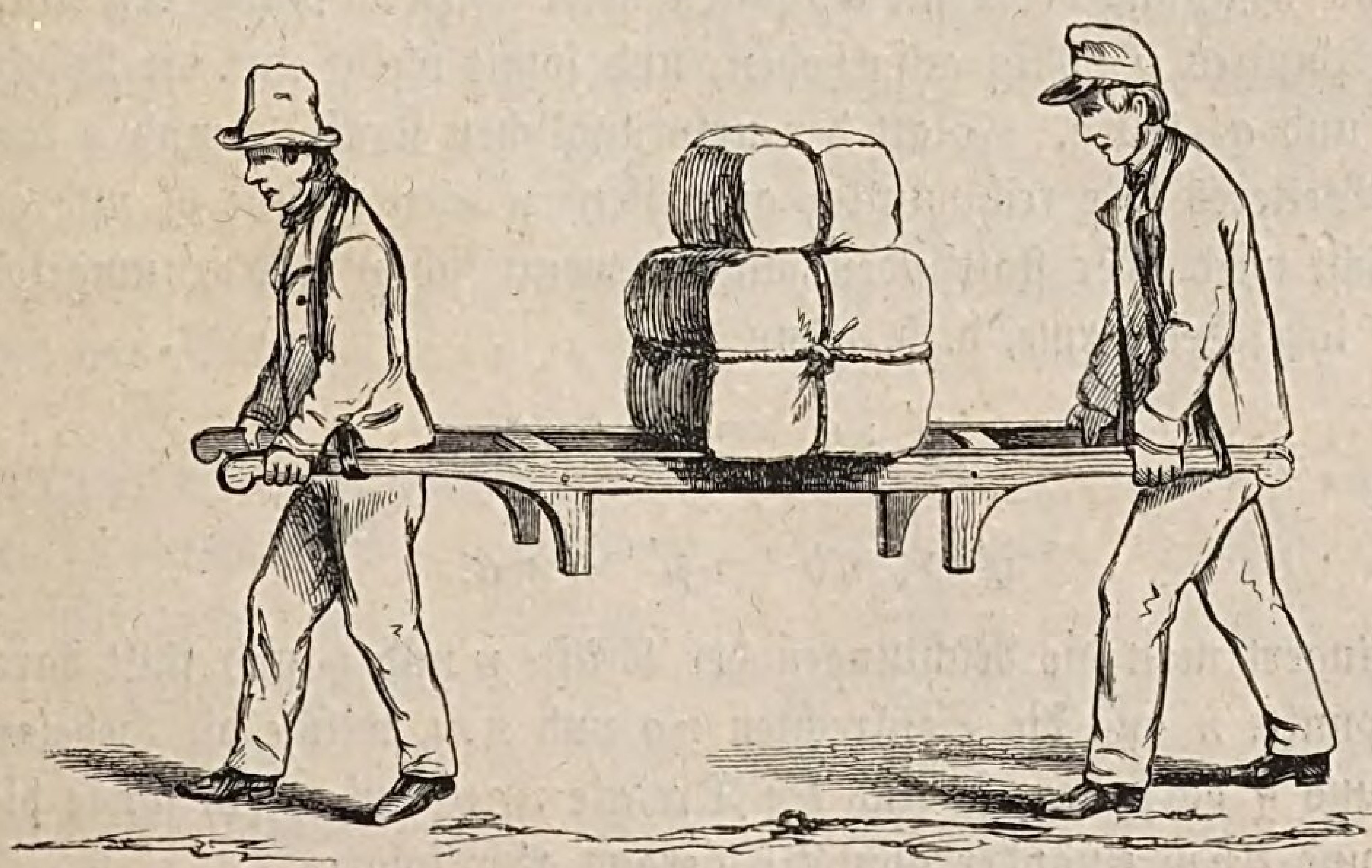


$\frac{1}{2}$

Weitere Beispiele des einarmigen Hebels bietet die Pumpe der hydraulischen Presse, das Sicherheitsventil u. s. w.

Auch die beiden Endpunkte m und n, Fig. 19, der Stange mn können

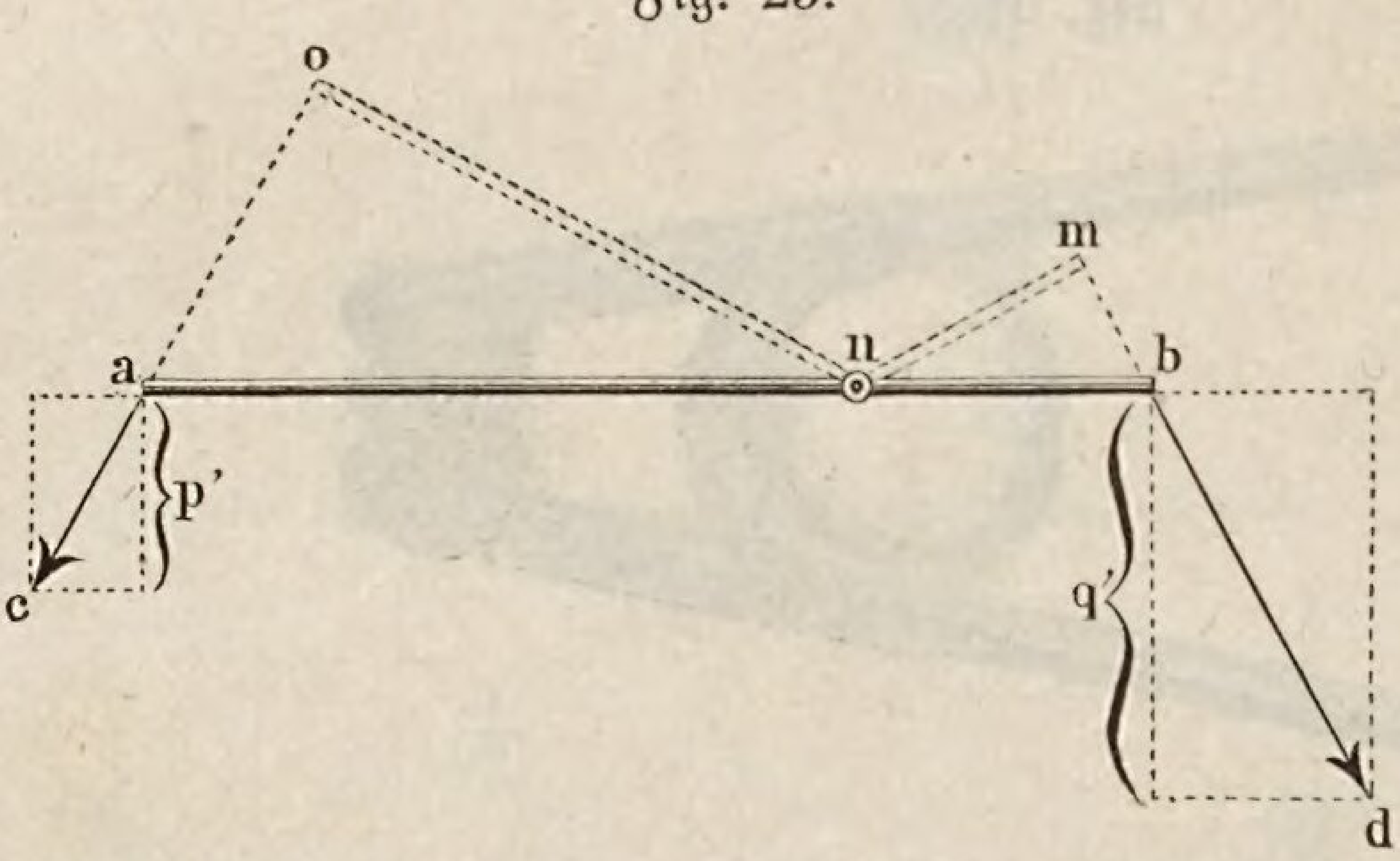
Fig. 22.



unterstützt sein, während in c eine Kraft N wirkt; alsdann aber hat der Punkt m einen Druck P, der Punkt n einen Druck P' auszuhalten. Wenn eine auf einer Tragbahre liegende Last durch zwei Leute getragen wird, so vertheilt sich die Last auf die beiden Träger, und wenn sie gerade in der Mitte der Bahre liegt, so kommt auf jeden die Hälfte der Last; wird aber die Last dem einen Träger näher gerückt, wie Fig. 22 (a. v. S.) andeutet, so hat dieser einen größeren Theil zu tragen. Gesetzt, die aufgelegte Last betrage 50 kg, die ganze Bahre sei 150 cm lang und der Schwerpunkt der Last liege 60 cm von dem einen, 90 cm von dem anderen Ende, so hat der eine Träger einen Druck von 30 kg, der andere einen Druck von 20 kg auszuhalten.

20 **Gleichgewicht am Hebel bei schiefwinklig angreifenden Kräften.** Wir haben bisher nur den Fall betrachtet, wo die Kräfte rechtwinklig gegen den Hebel wirkten; es kann aber auch Gleichgewicht stattfinden, wenn dies nicht der Fall ist. In Fig. 23 sei n der Stützpunkt des Hebels ab, in a wirke eine Kraft p nach der Richtung ac, in b eine andere, q, nach der Richtung bd. Die Kräfte p und q sollen sich verhalten wie die Linien ac und bd. Nach dem Satze vom Parallelogramm der Kräfte läßt sich p in zwei Kräfte zerlegen, von denen die eine, p', rechtwinklig auf ab, die andere in der Richtung von ab wirkt. Ebenso kann man auch die Kraft q in zwei Kräfte zerlegen, von denen die eine, q', rechtwinklig auf ab und die andere in der Richtung dieser Linie wirkt. Die Wirkung der beiden Seitenkräfte, welche in die Richtung der Linie ab fallen, wird offenbar durch den Widerstand des festen Punktes n völlig aufgehoben, und somit bleibt nur die Wirkung der Kräfte p' und q' übrig. Statt der ursprünglichen Kräfte p und q kann man also ohne Weiteres ihre rechtwinklig angreifenden Seitenkräfte p' und q' setzen. Gleichgewicht wird aber stattfinden müssen, wenn sich p' und q' umgekehrt verhalten wie ihre Hebelarme, d. h. wenn

Fig. 23.



$$p' : q' = nb : na,$$

oder wenn

$$q' \times nb = p' \times na.$$

Verlängert man die Richtungen der Kräfte p und q und fällt darauf von dem Drehpunkte n aus die Senkrechten no und nm, welche die Hebelarme der Kräfte p und q darstellen, so sind die Dreiecke acp' und ano, sowie die Dreiecke bdq' und bnm einander ähnlich; hieraus aber folgt:

$$q : q' = nb : nm \quad \text{oder} \quad q' \,.\, nb = q \,.\, nm$$

und

$$p : p' = na : no \quad \text{oder} \quad p' \,.\, na = p \,.\, no.$$

Da nun am Hebel Gleichgewicht stattfindet, wenn

$$q' \,.\, nb = p' \,.\, na$$

ist, so findet auch Gleichgewicht Statt, wenn

$$q \,.\, nm = p \,.\, no$$

ist, d. h. auch bei schiefwinklig angreifenden Kräften findet am Hebel Gleichgewicht Statt, wenn die statischen Momente der im entgegengesetzten Sinne drehenden Kräfte einander gleich sind. Ein Hebel mit schiefwinklig angreifenden Kräften wird **Winkelhebel** genannt.

Auf die eben entwickelte Weise findet man auch die Momente der Kräfte, wenn der Hebel nicht mehr eine gerade Linie ist, wie Fig. 24.

Fig. 24.

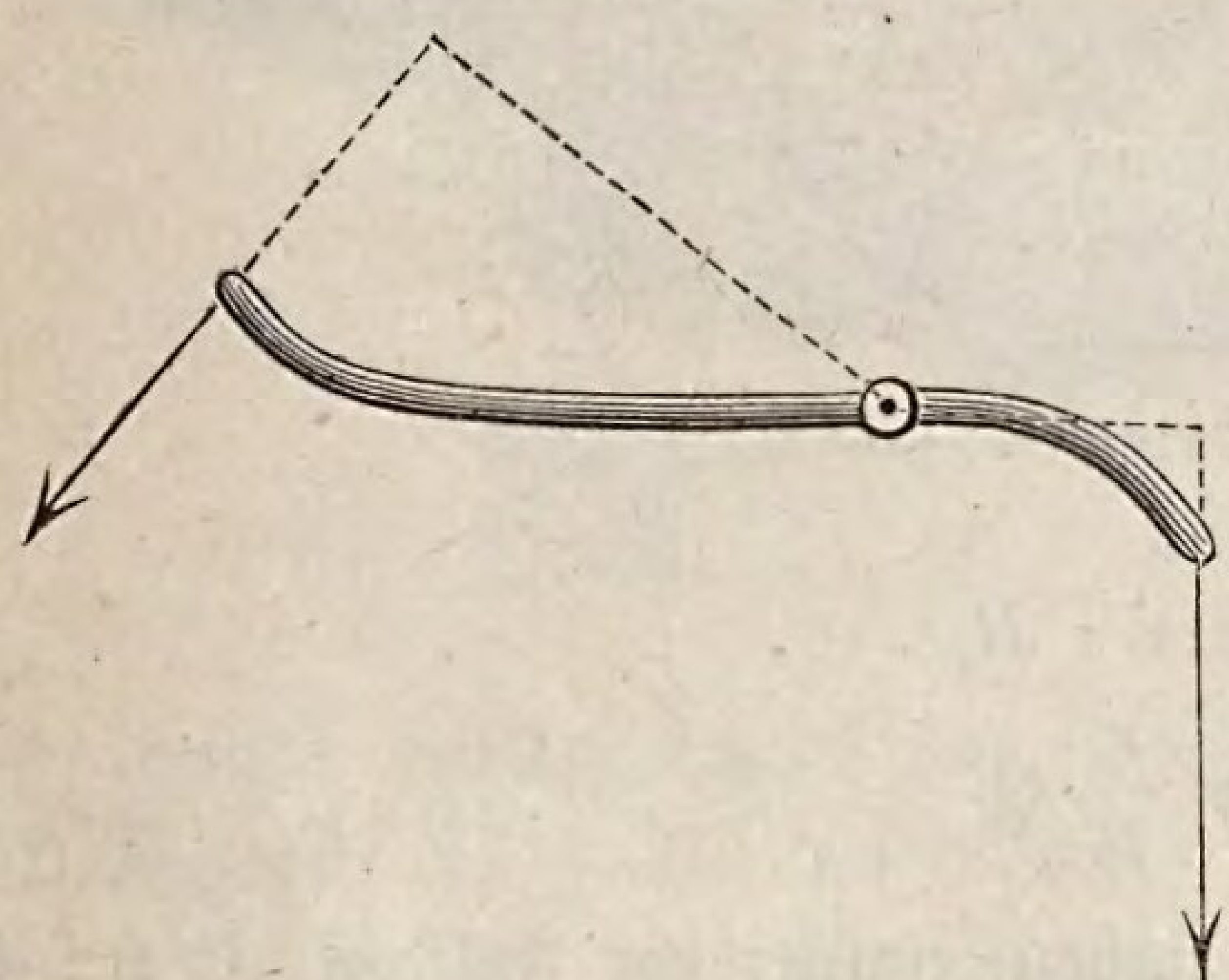
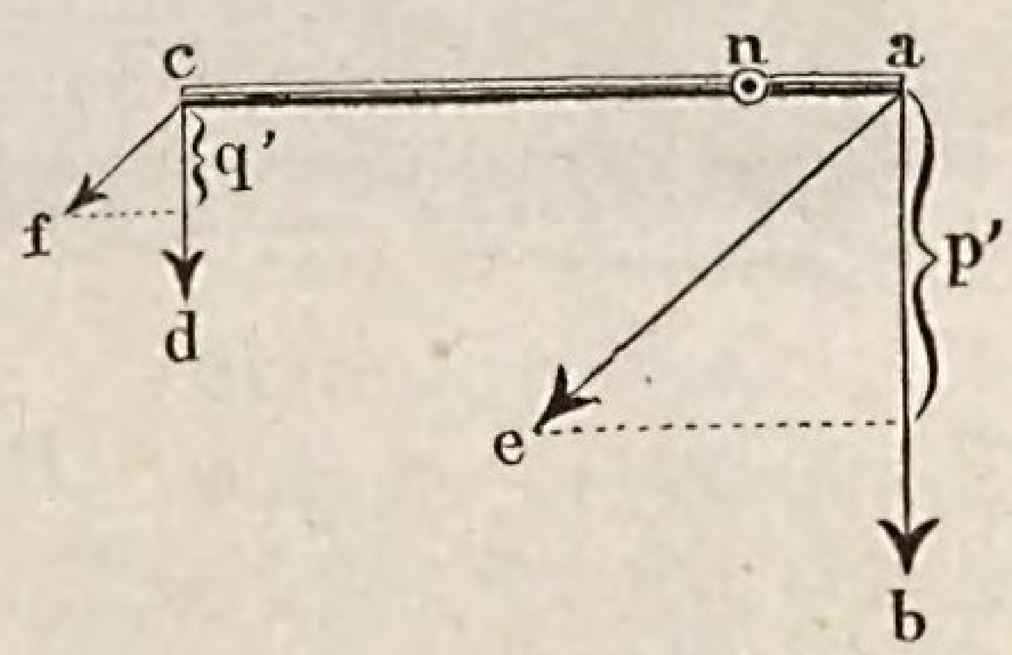


Fig. 25.

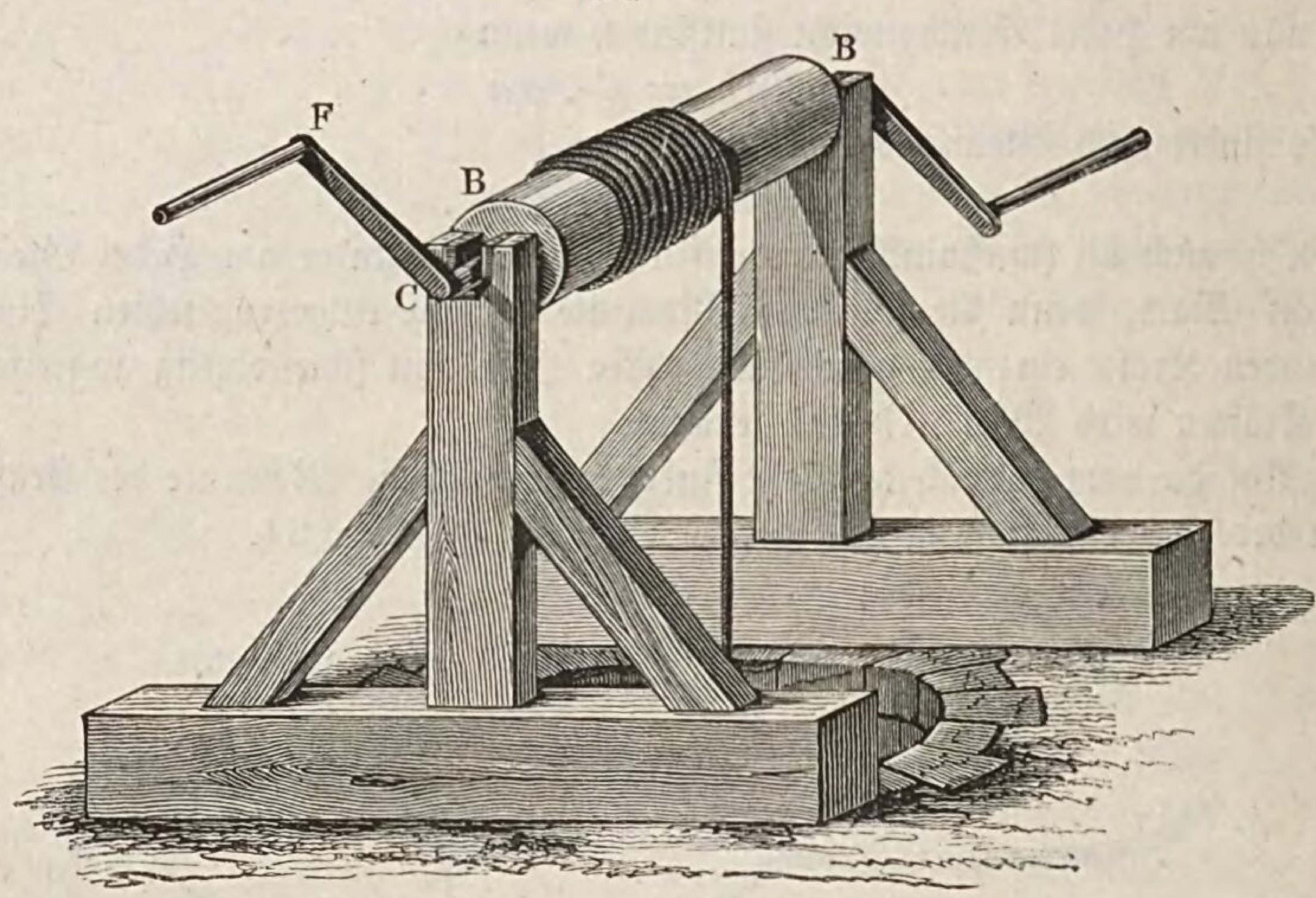


Wenn zwei parallele rechtwinklig angreifende Kräfte an einem Hebel einander das Gleichgewicht halten, so wird dieses nicht gestört, wenn man sie in gleichem Verhältniß vergrößert oder verkleinert. Ebenso wenig wird das Gleichgewicht gestört, wenn beide Kräfte ihre Richtung so ändern, daß sie unter sich parallel bleiben. Wenn z. B. die Kräfte $ab = p$ und $cd = q$ an dem Hebel ac, Fig. 25, sich das Gleichgewicht halten, so besteht dasselbe auch noch, wenn man dieselben Kräfte nach den einander parallelen Richtungen ae und cf wirken läßt; denn die schräg wirkende Kraft p wirkt wie ihre rechtwinklige Composante p' und die schräg wirkende q wie die rechtwinklig angreifende Seitenkraft q'; p' und q' halten sich aber gewiß das Gleichgewicht, wenn es zwischen den Kräften p und q bestand, da $p : p' = q : q'$ ist.

Haspel und Räderwerke. Wenn irgend ein fester Körper um 21
eine feste Axe drehbar ist, so wirken die Kräfte, welche ihn um diese Axe zu drehen suchen, ganz nach den Gesetzen des Hebels. Deshalb finden diese Gesetze bei den vielen Maschinen eine Anwendung, welche sich in ein mehr oder weniger complicirtes System von Hebeln zerlegen lassen. Beim **Haspel** z. B., Fig. 26 (a. f. S.), verhält sich die Kraft P, welche am Hebelarme CF angreift, zu der Last Q, welche an dem um die Welle BB geschlungenen Seile hängt,

wie der Radius r des Wellbaumes BB zur Länge R des Hebelarmes CF, d. h. es ist:

Fig. 26.



$$P : Q = r : R,$$

also
$$P = \frac{r}{R} \cdot Q \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

Wenn, wie es bei solchen Haspeln nahezu immer der Fall ist, $R = 4r$, so haben wir also $P = \frac{1}{4}\,Q$. Mit einer Kraft von 25 Pfund an der Kurbel des Haspels angreifend, kann man also eine Last von 100 Pfund heben.

Das Verhältniß zwischen der an der Maschine angreifenden Kraft und der Last, welche man mit derselben heben kann, wird häufig auch mit dem Namen der Uebersetzung bezeichnet. Die Uebersetzung am Haspel ließe sich nun dadurch steigern, daß man einerseits den Radius r des Wellbaumes verkleinerte oder andererseits den Hebelarm CF vergrößerte. In der Praxis aber darf man r nicht zu sehr verkleinern, weil dadurch die Tragkraft der Welle vermindert wird, und eine Vergrößerung von R über gewisse Gränzen hinaus ist wegen der Körperdimensionen des Arbeiters unmöglich.

Um eine stärkere Uebersetzung zu erhalten als man sie mit dem einfachen Haspel erreichen kann, werden zusammengesetzte Räderwerke angewandt, d. h. statt die Last direct an der durch die Kraft P umgedrehten Welle anzubringen, überträgt man die Bewegung dieser Welle auf den Umfang eines größeren Rades, an dessen Welle erst die Last hängt.

Die Uebertragung der Bewegung von einer Welle auf ein Rad geschieht entweder durch Zähne, oder durch Riemen oder Seile.

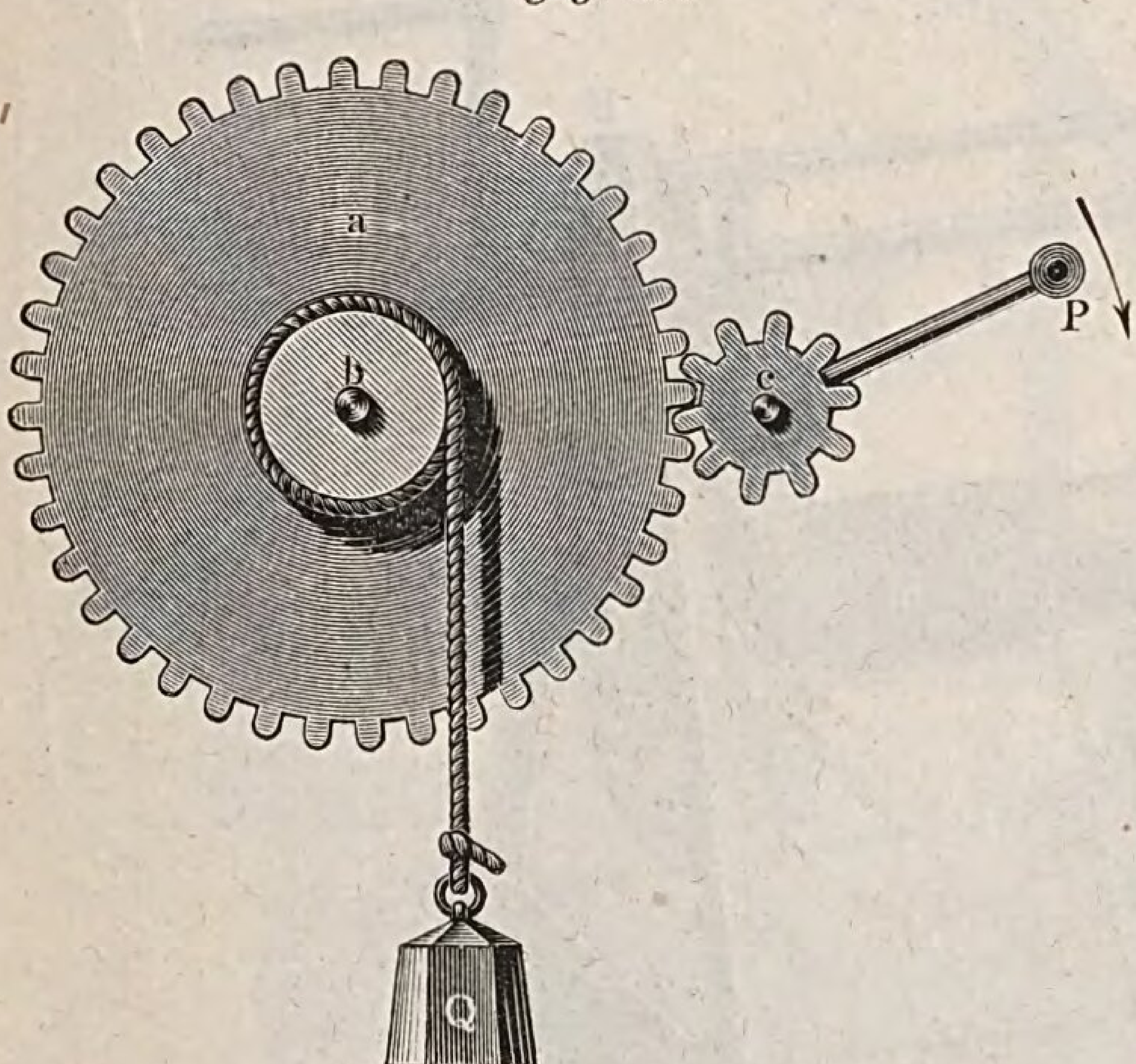
In dem Fig. 27 dargestellten Räderwerk wird die Uebertragung der Bewegung von einer Axe auf eine andere durch Zahnräder vermittelt.

Um die Last Q zu heben, welche an der um eine feste Axe drehbaren

Welle b hängt, muß an dem Umfange des auf derselben Axe sitzenden gezahnten Rades a eine Kraft K angebracht werden, deren Werth

$$K = \frac{r}{R} Q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Fig. 27.



ist, wenn r der Radius des Wellbaumes b, R aber der Radius des gezahnten Rades a ist.

Die Umdrehung des Rades a wird aber durch die Umdrehung des gleichfalls um eine feste Axe drehbaren Triebes c (eines Zahnrades von kleinerem Durchmesser) bewirkt, dessen Zähne in die Zähne des Rades a eingreifen und um Gleichgewicht zu erhalten mit der Kraft K gegen dieselben drücken müssen. Damit aber die Zähne des Triebes c, welcher mit der Kurbel auf einer und derselben festen Axe sitzt, mit einer Kraft K gegen die Zähne des Rades a drücken können, so muß die Kraft P, welche am Ende des Kurbelarmes wirkt, sein:

$$P = \frac{r'}{R'} K \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

wenn r' den Radius des Triebes c, R' aber die Länge des Hebelarmes bezeichnet, an dessen Ende P wirkt.

Setzt man den Werth von K aus 2) in 3), so kommt:

$$P = \frac{r}{R} \cdot \frac{r'}{R'} Q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Der Radius des Triebes c verhält sich zum Radius des Rades a wie der Umfang des Triebes zum Umfang des Rades; die Umfänge aber verhalten sich wie die Anzahl der Zähne, welche sie tragen. Bezeichnet man daher die Anzahl der Zähne des Rades mit n, die des Triebes mit n', so ist auch

$$r' : R = n' : n.$$

Führt man den Werth des Verhältnisses von r' zu R in die Gleichung 4) ein, so ergiebt sich:

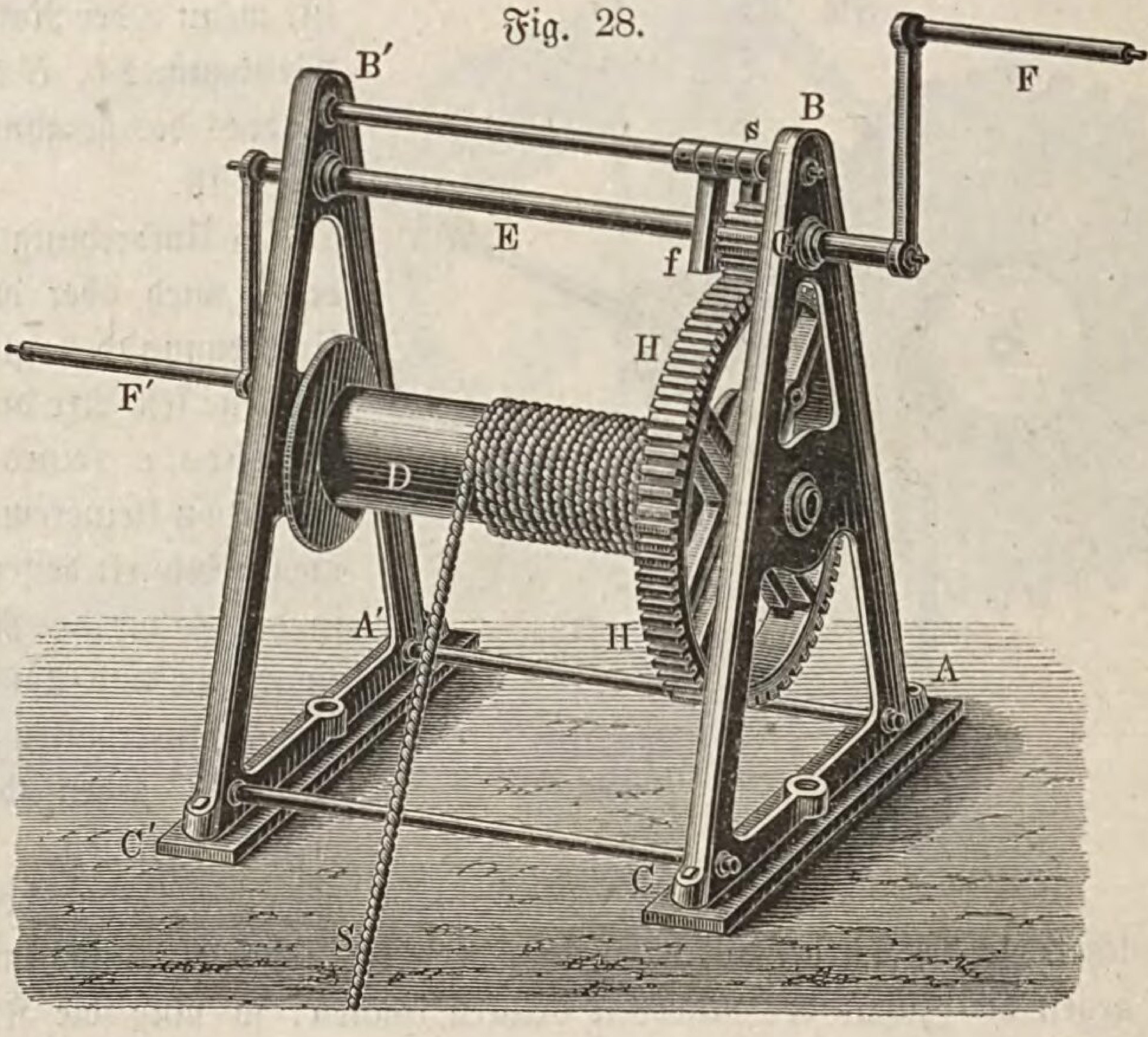
$$P = \frac{r}{R'} \cdot \frac{n'}{n} Q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

An der Vorrichtung Fig. 28 (a. f. S.) sei z. B. der Radius der Kurbel, an welcher der Arbeiter angreift, also $R' = 0{,}5$ m, der Radius der Welle D aber, an welcher die Last hängt, also $r = 0{,}12$ m; ferner habe der auf der

Kurbelaxe sitzende Trieb $n' = 12$, das Rad H aber $n = 72$ Zähne, so haben wir:

$$P = \frac{0,12}{72} \cdot \frac{12}{0,5}\, Q = 0,04\, Q.$$

Fig. 28.



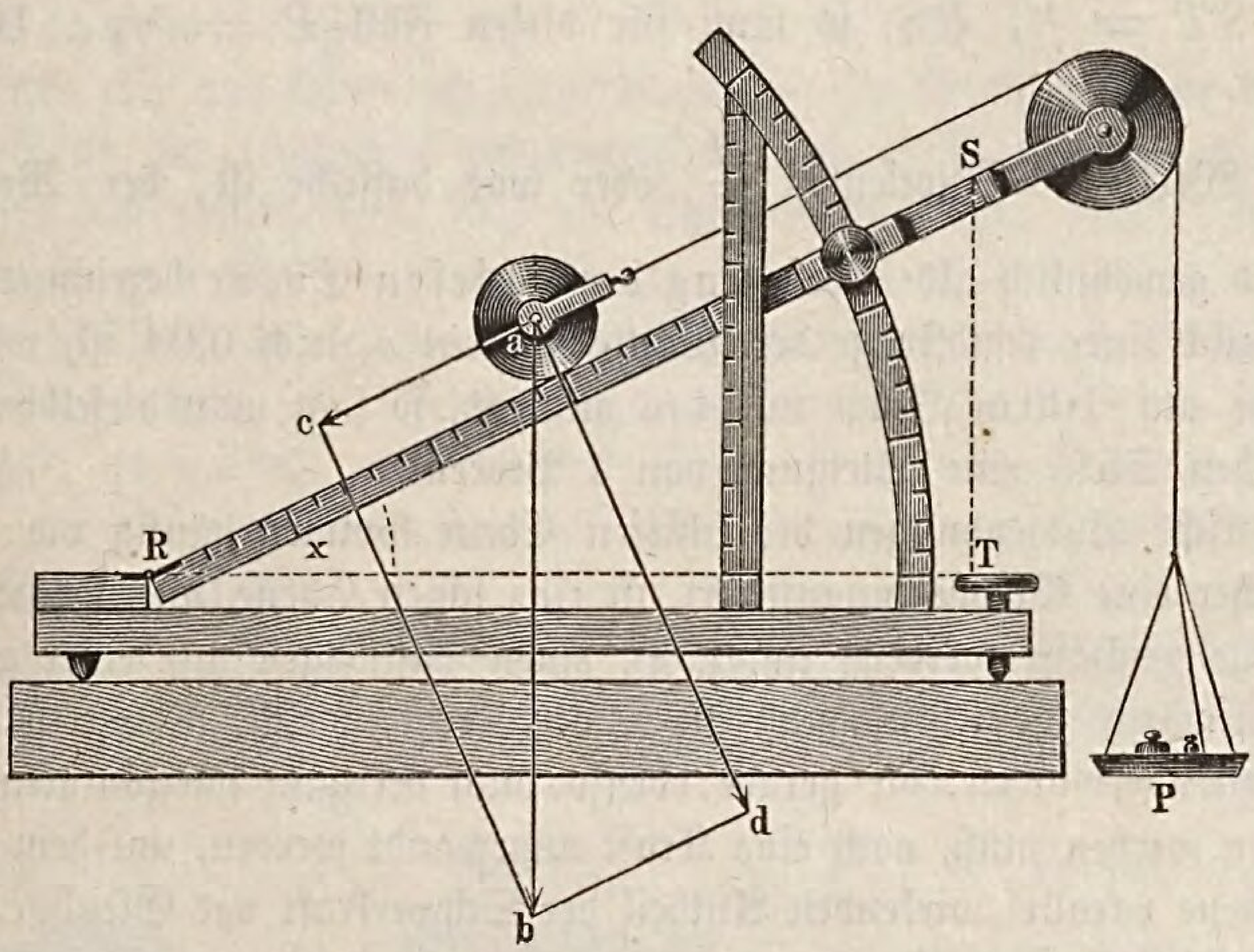
Räderwerke werden nicht allein benutzt, um große Lasten mit kleinen Kräften zu heben, wie dies z. B. bei Krahnen der Fall ist, sondern auch um die Drehung einer Axe in eine schnellere oder langsamere zu verwandeln. So macht bei dem Räderwerk Fig. 28 die Kurbelaxe sechs Umdrehungen, während sich die Welle D einmal umdreht.

Ein Mühlstein muß mit ziemlich großer Geschwindigkeit umgedreht werden, während das Wasserrad sich sehr langsam umdreht; durch Vermittelung eines Räderwerks wird nun die langsame Umdrehung des Wasserrades in eine rasche Umdrehung des Mühlsteins verwandelt. Aehnliches findet auch bei Uhren Statt.

22 **Die schiefe Ebene** bietet uns ein praktisches Beispiel von der Zerlegung der Kräfte dar. Wenn sich eine Last a auf einer Ebene RS, Fig. 29, befindet, welche mit der Horizontalen einen Winkel x bildet, so ist die nach der Richtung ba wirkende Schwere des Körpers nicht mehr rechtwinklig gegen die Ebene gerichtet, und die Ebene hat deshalb auch nicht mehr den vollen Druck der Last auszuhalten. In der That läßt sich die Schwere des Körpers in zwei andere Kräfte zerlegen, von denen die eine rechtwinklig gegen die Ebene als Druck wirkt, während die andere parallel mit der schiefen Ebene wirkend den Körper herabtreibt. Die Größe dieser beiden Kräfte läßt sich leicht durch Construction

ermitteln. Wenn ab die Größe und Richtung der Schwerkraft darstellt, so haben wir durch a nur eine Linie rechtwinklig zur schiefen Ebene und eine andere parallel mit derselben zu ziehen und sodann von b aus die Perpendikel bd

Fig. 29.



und bc auf diese Linien zu fällen. Die Linie ad stellt uns die Größe des Druckes dar, welchen die Ebene auszuhalten hat, ac aber die Größe der Kraft, welche die Last zur schiefen Ebene heruntertreibt.

Nun aber ist das Dreieck abc dem Dreiecke RST ähnlich, und zwar verhält sich $ab : ac = RS : ST$, und daraus folgt, daß die Kraft, welche den Körper zur schiefen Ebene heruntertreibt, sich zu seinem Gewichte verhält, wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge.

Bezeichnen wir daher durch

Q das Gewicht des Körpers, welches in obiger Zeichnung durch die Linie ab dargestellt war, durch

P die Kraft ac, welche den Körper zur schiefen Ebene heruntertreibt, ferner durch

H die Höhe ST der schiefen Ebene und endlich durch

L die Länge RS derselben, so haben wir

$$Q : P = L : H$$

oder

$$P = Q\frac{H}{L}.$$

Es ist aber auch $\frac{H}{L} = \sin x$, wenn wir mit x den Winkel bezeichnen, welchen die schiefe Ebene mit der Horizontalen macht. Wir haben also für die Beziehung zwischen Kraft P und Last Q auf der schiefen Ebene auch die Gleichung

$$P = Q \sin x.$$

Ist z. B. das Gewicht der Walze *a*, d. h. die Last $Q = 1000$ g, so ergiebt sich $P = 500$ g, wenn $x = 30^0$ und $P = 333$ g, wenn $x = 19^0\ 30'$ ist, weil $\sin 30^0 = 0{,}5$ und $\sin 19^0\ 13' = 0{,}333$ ist.

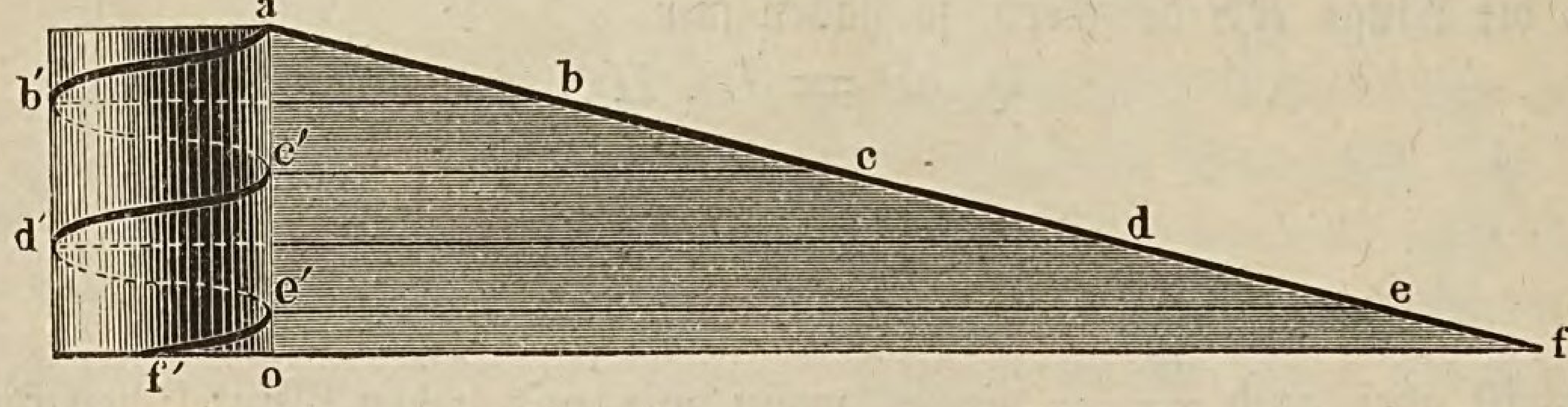
Da $\sin 14^0\ 13'$ sehr nahe gleich $^1/_4$ ist, d. h. da für den Winkel $x = 14^0\ 13'$ $ST = {}^1/_4\ RS$, so muß für diesen Fall $P = {}^1/_4\ .\ 1000 = 250$ g sein.

Der Werth des Quotienten $\frac{H}{L}$, oder was dasselbe ist, der Werth von $\sin x$ wird gewöhnlich als Steigung der schiefen Ebene bezeichnet. Wenn für ein Stück einer Landstraße der Werth von $\sin x$ gleich 0,04 ist, wenn also die Straße auf 100 m Länge um 4 m ansteigt, so sagt man dieselbe habe an der fraglichen Stelle eine Steigung von 4 Procent.

Praktische Anwendungen der schiefen Ebene kommen häufig vor. Jeder Weg, welcher eine Anhöhe hinaufführt, ist eine schiefe Ebene, auf welcher Lasten in die Höhe geschafft werden; um z. B. einen Lastwagen auf einer geneigten Straße aufwärts zu ziehen, muß außer der Kraft, welche nöthig ist, um die Reibung zu überwinden, die gerade ebenso auch bei ganz horizontalen Wegen überwunden werden muß, noch eine Kraft angewandt werden, um dem mit der schiefen Ebene parallel wirkenden Antheil der Schwerkraft das Gleichgewicht zu halten. Dieser Antheil ist aber um so größer, je steiler der Weg ist. Aus diesem Grunde führt man an steilen Bergen die Fahrstraßen nicht gerade aus, sondern man zieht es vor, große Umwege zu machen und den Weg in Windungen, die weniger steil sind, auf den Gipfel zu führen. — Bei Bauten aller Art kommt es häufig vor, daß die Materialien auf schiefen Ebenen in die Höhe geschafft werden, ja häufig werden solche schiefe Ebenen auf besonders zu diesem Zwecke aufgeschlagenen Gerüsten angelegt. Diese Anwendung der schiefen Ebene war schon im grauen Alterthume bekannt; denn höchst wahrscheinlich bedienten sich ihrer die alten Aegypter, um die ungeheuren Steinblöcke in die Höhe zu schaffen, welche sie zu ihren Pyramiden verwandten.

23 **Die Schraube.** Es sei *aof*, Fig. 30, ein rechtwinkliges Stück Papier, dessen verticale Kathete an einem Cylinder befestigt ist. Wird nun das

Fig. 30.



Papier um den Cylinder herumgewickelt, so bildet die Hypotenuse *af* auf dem Cylinder eine Schraubenlinie, deren Lauf man in der Figur leicht verfolgen kann.

Ist $c'c$ gleich dem Umfange des Cylinders, so wird beim Umwickeln c nach c' vertical unter a kommen. Der Punkt b kommt nach b', d nach d' u. s. w. Die auf die hintere Seite des Cylinders fallenden Stücke der Schraubenlinie sind punktirt. Die Höhe von a bis c', von b' bis d' u. s. w. ist die Höhe eines Schraubenganges.

Denken wir uns längs der Schraubenlinie ein Dreieck, dessen eine Seite mit der Seite des Cylinders zusammenfällt und gleich der Ganghöhe ist, so fortbewegt, daß dasselbe seine Lage zur Cylinderachse nicht ändert, so entsteht ein sogenanntes scharfes Schraubengewinde, wie ein solches in Fig. 31 dargestellt ist; denkt man sich aber ein Rechteck, dessen Höhe gewöhnlich halb so groß ist als die Höhe eines Schraubenganges, auf dieselbe Weise um den Cylinder geführt, so entsteht ein flaches Schraubengewinde; ein solches ist Fig. 32 dargestellt. Ein mit einem Schraubengewinde versehener Cylinder wird Schraube genannt.

Wir haben bisher nur solche Schraubengewinde betrachtet, welche um einen massiven Cylinder herumgelegt sind; Schrauben, welche auf diese Weise gebildet sind, werden Schraubenspindeln genannt; werden aber die Gewinde auf

Fig. 31.

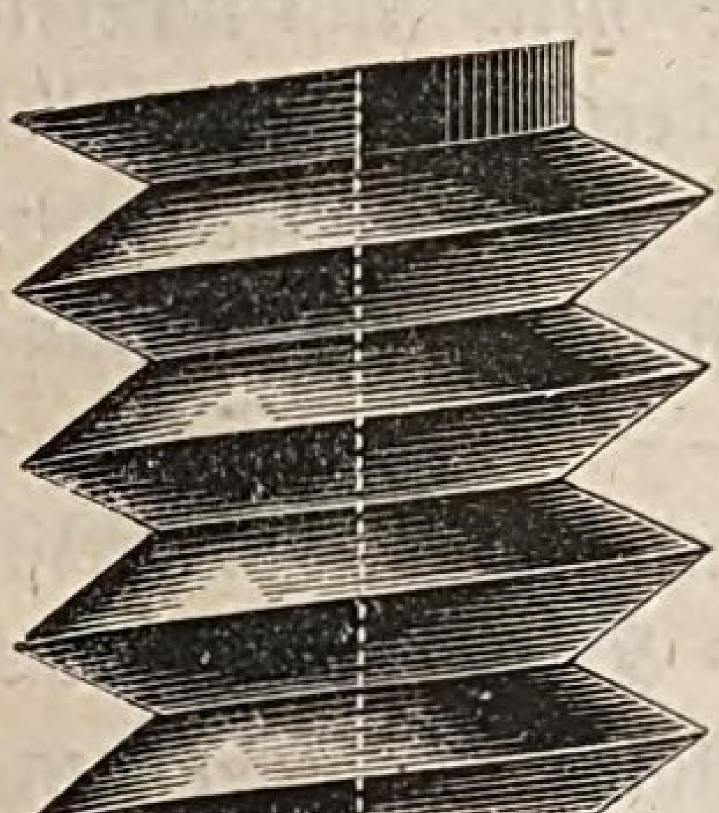


Fig. 32.

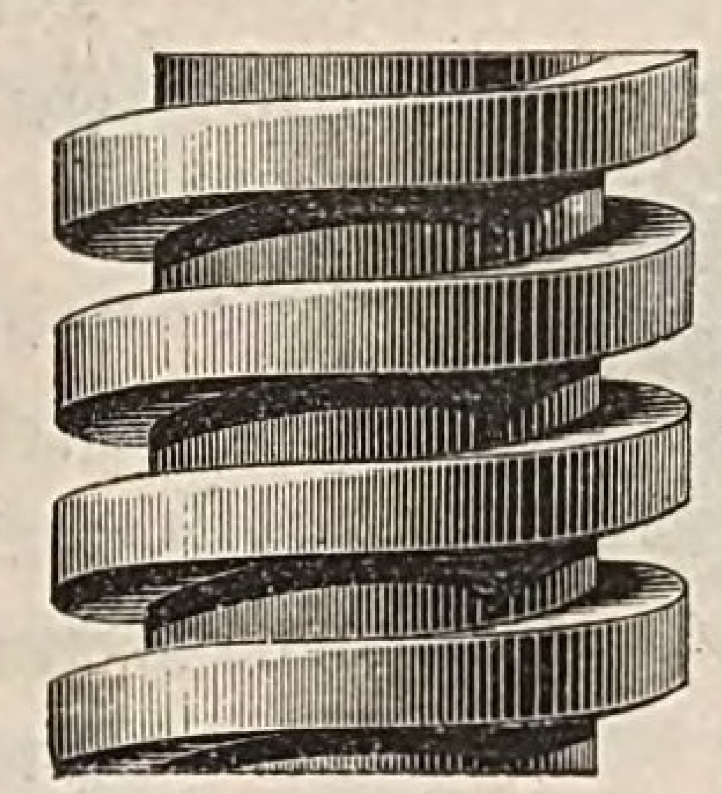
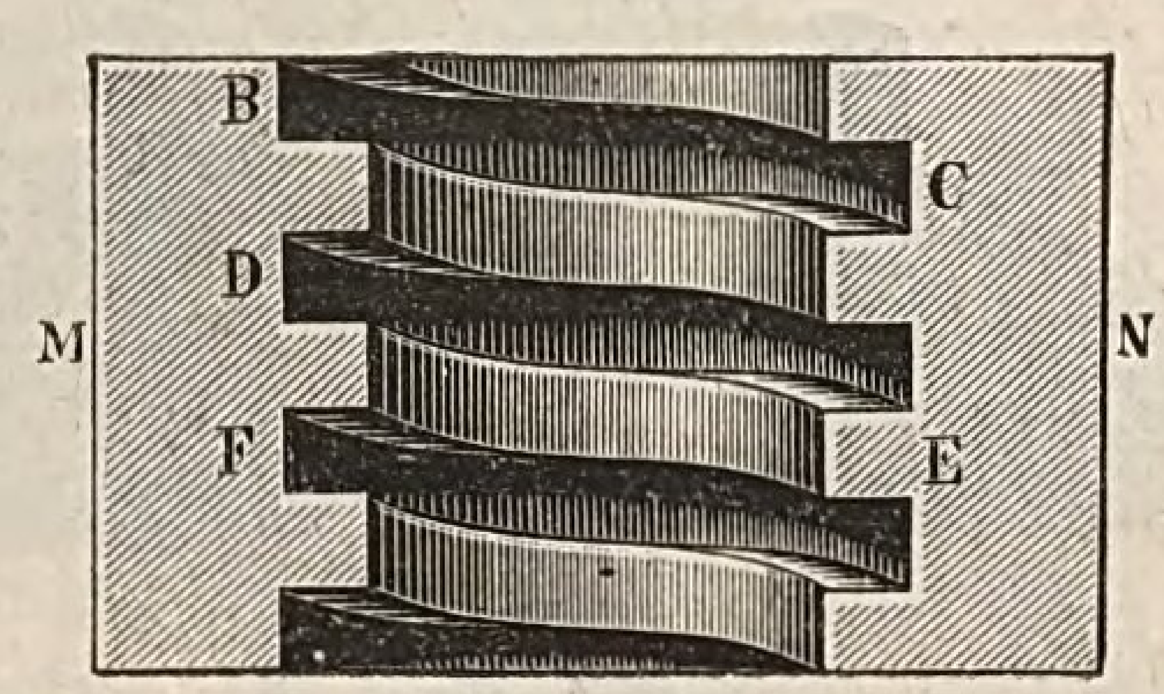


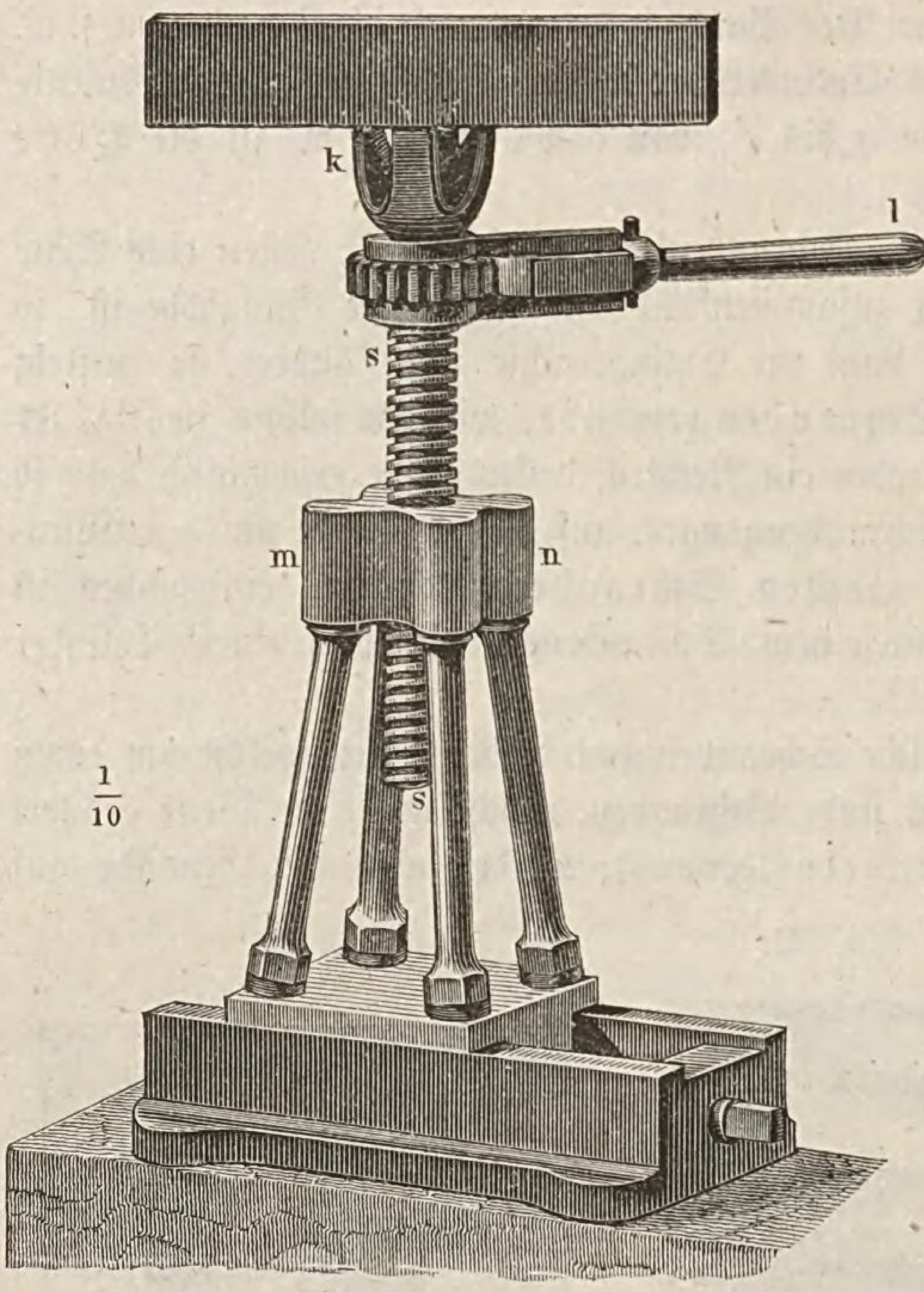
Fig. 33.



dieselbe Weise im Innern eines hohlen Cylinders herumgeführt, so entsteht eine Schraubenmutter, Fig. 33.

Eine Schraubenspindel ist für sich allein zum Fortschieben oder Heben einer Last oder zur Ausübung eines starken Druckes nicht zu gebrauchen; sie muß mit einer Schraubenmutter so verbunden sein, daß die Erhabenheiten der einen genau in die Vertiefungen der anderen passen. Fig. 33 stellt den Durchschnitt einer Schraubenmutter dar, welche zur Spindel Fig. 32 paßt. Ist eine Schraubenspindel vertical gestellt, wie bei der Schraubenwinde Fig. 34 (a. f. S.), und die Schraubenmutter in mn fest, so wird die Schraubenspindel s bei jeder Umdrehung um die Höhe eines Schraubenganges auf- oder niedergehen, indem die Windungen der Schraubenspindel auf den Windungen der Schraubenmutter wie auf einer schiefen Ebene auf- und niedergleiten. Sollte eine auf der Schraubenspindel liegende Last durch Umdrehung derselben gehoben werden, so ist klar, daß hier dieselben Gesetze gelten, wie bei einer schiefen Ebene von gleicher Steigung. Es muß sich also die (am Umfange der Spindel angebrachte) Kraft P für den Fall des Gleichgewichts an der Schraube zur Last Q verhalten, wie die Höhe H des Schraubenganges zum Umfange U der Spindel, d. h. es ist

Fig. 34.



$$P = Q \frac{H}{U} \text{ oder}$$

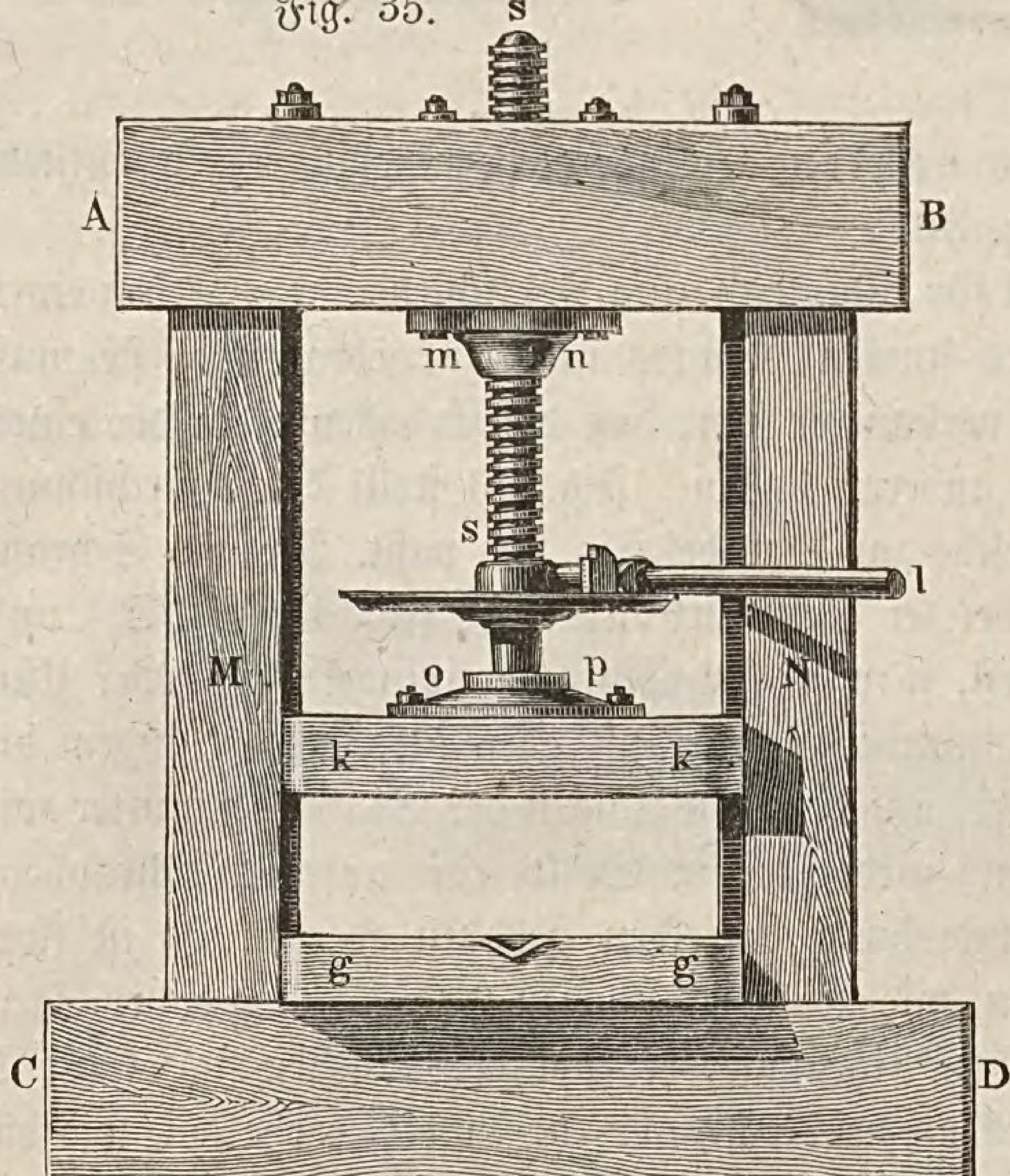
$$P = Q \frac{H}{2\pi r}$$

wenn wir durch r den Radius der Schraubenspindel und durch π das bekannte Verhältniß der Kreisperipherie zum Durchmesser bezeichnen.

Die Schraubenpresse, Fig. 35, ist ein anderes Beispiel von der Anwendung der Schraube. Eine Schraubenspindel s paßt in die feste, in den Querbalken AB eingelassene eiserne Mutter mn. Am unteren Ende der Schraubenspindel ist ein Hebel l angebracht, mittelst dessen man sie umdreht. — Mit der Schraubenspindel s ist mittelst eines Kugelgelenkes die Preßplatte kk verbunden, welche der auf- und niedergehenden Bewegung der Schraube folgt, ohne an deren Umdrehung Theil zu nehmen. Auf die Platte g wird der auszupressende Körper gelegt, welcher natürlich mit großer Kraft zusammengedrückt wird, wenn man die Schraube in der entsprechenden Richtung dreht.

Um den Effect einer Schraube richtig zu berechnen, darf man die Reibung nicht außer Acht lassen, die hier eine große Rolle spielt, wie wir später

Fig. 35.



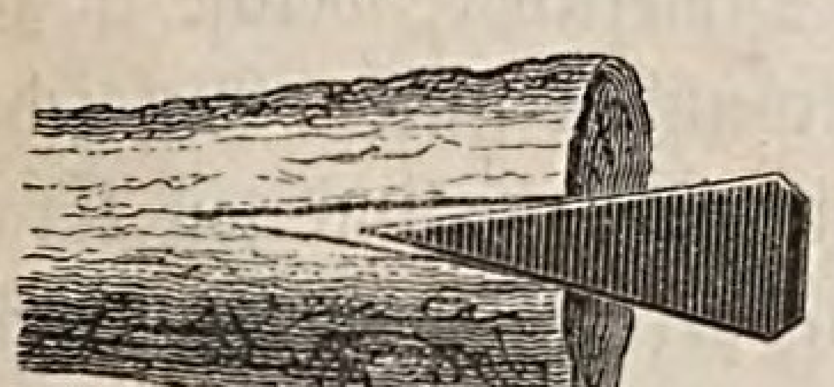
noch sehen werden. Um aus der Schraube eine kräftige Maschine zu machen, läßt man die Kraft, welche ihre Umdrehung bewirkt, nicht direct am Umfange der Schraube, sondern an einem größeren Hebelarme wirken, wie man dies bei der Schraubenpresse, Fig. 35, sowohl wie bei der Schraubenwinde, Fig. 34, sieht.

Auch zu anderen Zwecken als zur Ausübung eines großen Druckes wird die Schraube noch angewandt. Eine drehbare Schraubenspindel, welche in ihrer Längenrichtung nicht verschiebbar ist, wird eine zwar verschiebbare aber nicht drehbare Schraubenmutter bei jeder Umdrehung um einen Schraubengang voranschieben; bei gleichförmiger Umdrehung der Schraube wird also auch die Mutter mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortgeschoben. Darauf beruht das gleichmäßige Fortschieben des Supports an Drehbänken u. s. w.

Da bei einigermaßen feinen Schraubengängen selbst einer ganzen Umdrehung des Schraubenkopfes nur eine sehr geringe fortschreitende Bewegung entspricht, so benutzt man bei Meßinstrumenten eine feine Schraube zur genaueren Einstellung. — Da man ferner, wenn der Schraubenkopf einigermaßen groß ist, noch den 100sten Theil einer ganzen Umdrehung messen kann, so ist man auch im Stande, vermittelst einer solchen Schraube noch ein Fortschieben um den 100sten Theil der ohnehin schon geringen Höhe eines Schraubenganges zu messen; eine feine Schraube kann also als Mikrometerschraube zur Hervorbringung und Messung sehr kleiner Längenverschiebungen angewandt werden. In dieser Weise benutzt man die Mikrometerschraube bei Mikroskopen zur Messung kleiner Gegenstände.

Der Keil. Eine andere Form, in welcher die schiefe Ebene zur Anwendung kommt, ist der Keil; derselbe besteht aus einem dreiseitigen Prisma 24
von Holz oder Metall, auf welches Kräfte wirken und kann betrachtet werden als eine bewegliche schiefe Ebene. Der Keil wird vielfach angewendet, so zum Spalten des Holzes und der Steine; auf den Werften werden die Schiffe dadurch gehoben, daß man Keile unter die Kiele treibt; das Auspressen des Oels aus dem zerriebenen Samen wird gewöhnlich durch Eintreiben von Keilen bewerkstelligt u. s. w. Alle unsere Schneidewerkzeuge, Messer, Scheeren, Meißel u. s. w., sind nichts anderes als Keile. Daß die Wirkung des Keils sich wirklich auf die der schiefen Ebene zurückführen läßt, kann man durch den Apparat Fig. 37 (a. f. S.) erläutern. Der Keil k soll zwischen den Rollen a und b hindurchgezogen werden; a ist fest, b an dem beweglichen Brette s befestigt. Auf s liegt ein Gewicht P; mit einem kleinen Gewichte Q, welches in der Wagschale w liegend den Keil nach der Rechten zieht, kann man eine verhältnißmäßig große Last P heben, und zwar eine um so größere, je schmäler der Rücken des Keils im Vergleich zu seiner Länge ist.

Fig. 36.

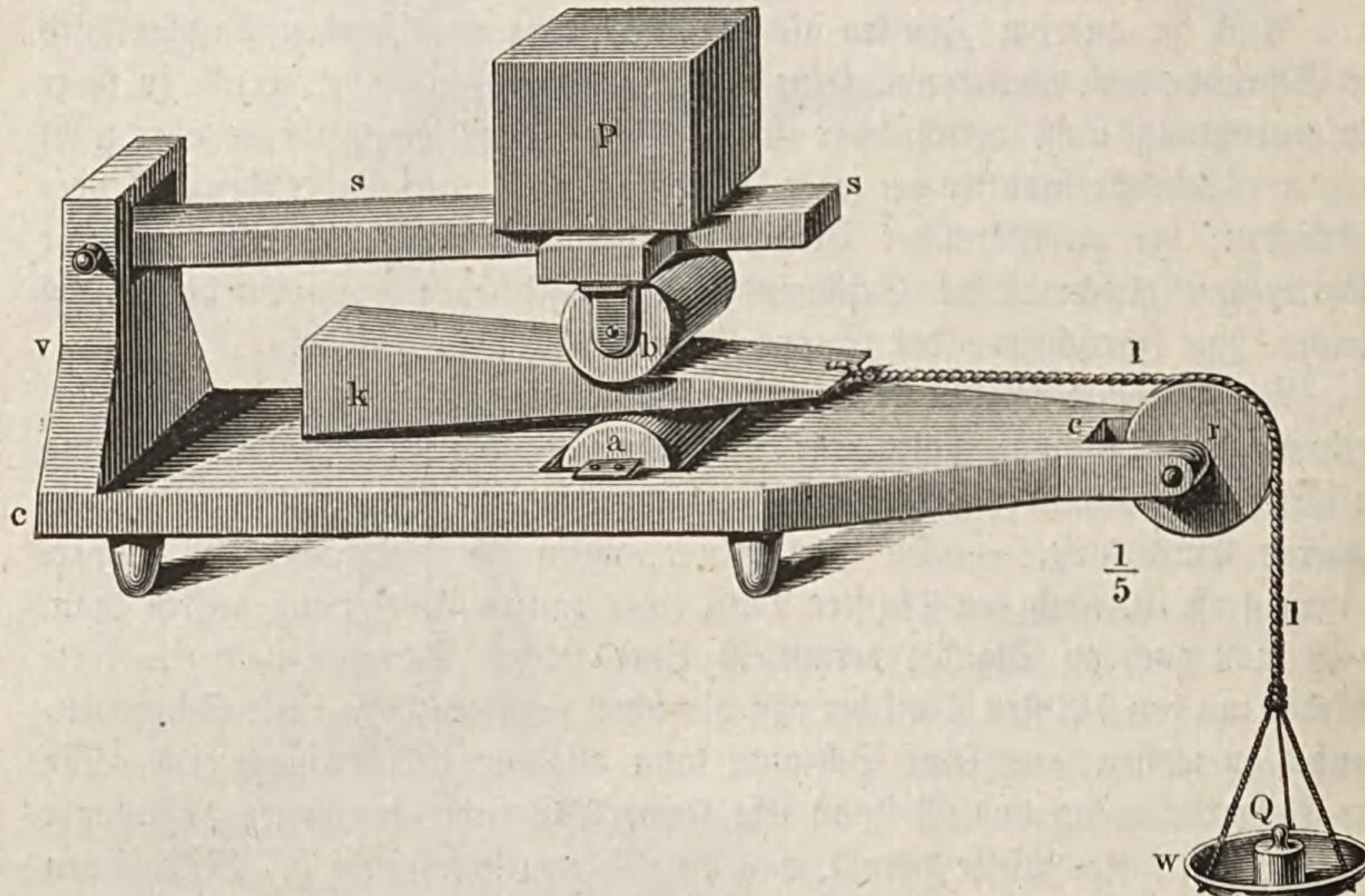


Aus der Theorie der schiefen Ebene läßt sich leicht ableiten, daß zwischen der Kraft Q und der Last P am Keil Gleichgewicht stattfindet, wenn

$$Q = P \sin\alpha,$$

vorausgesetzt, daß die Last P rechtwinklig auf die Seitenfläche, die Kraft Q rechtwinklig gegen den Rücken wirkt und daß mit α der Winkel der Schneide bezeichnet wird.

Fig. 37.



Wenn der Winkel α nicht groß ist, läßt sich das Gesetz des Gleichgewichtes am Keil in Worten auch so ausdrücken: Eine Kraft Q, welche rechtwinklig gegen den Rücken des Keils wirkt, hält einem rechtwinklig gegen die Seite des Keils wirkenden Druck P das Gleichgewicht, wenn sich Q zu P verhält, wie die Breite des Keilrückens zur Länge des Keils.

25 **Schwerpunkt.** Jeder feste Körper, z. B. ein Stein, ein Stück Holz u. s. w., besteht aus einer gewissen Anzahl von Molekülen, welche in bestimmter gegenseitiger Stellung zu einem Ganzen verbunden sind. Auf jedes dieser Moleküle wirkt die Schwere und treibt es mit einer bestimmten Kraft gegen den Mittelpunkt der Erde hin. Die Richtung der Schwerkraft ist für alle Moleküle des Körpers dieselbe, der Körper wird also durch eine Anzahl unter sich paralleler Kräfte gegen die Erde getrieben. Die Resultirende (die Summe) aller dieser Einzelkräfte ist es, was wir das Gewicht des Körpers nennen.

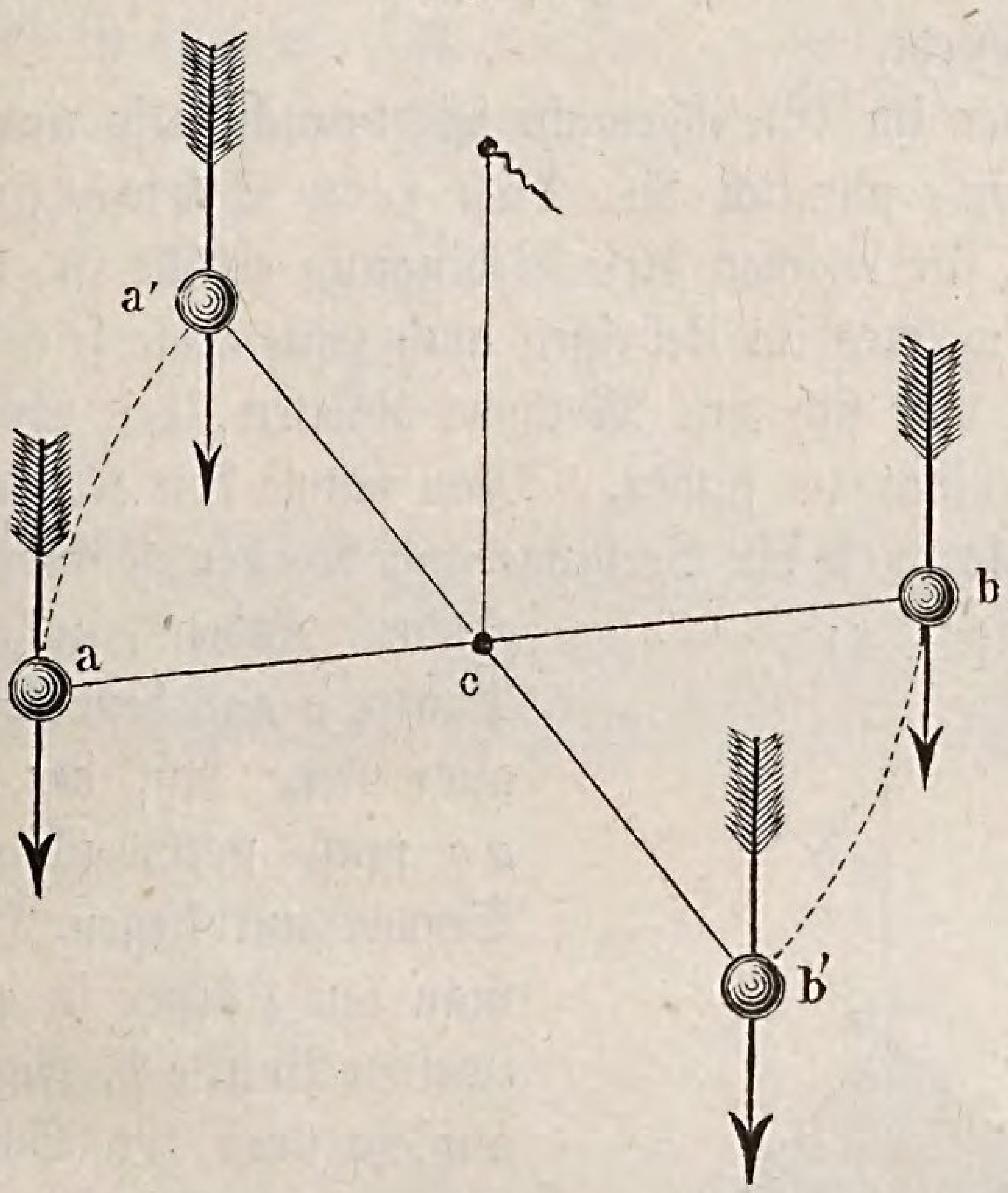
Der Angriffspunkt dieser Resultirenden wird Schwerpunkt genannt.

Die Lage dieses Schwerpunktes bleibt in Beziehung auf den Körper unveränderlich dieselbe, wie man den Körper auch drehen und wenden mag, wie sich aus folgender Betrachtung ergiebt.

Stellen wir uns vor, die beiden Punkte a und b, Fig. 38, seien zwei gleich schwere, durch die gerade, feste, gewichtlose Linie ab verbundene Moleküle,

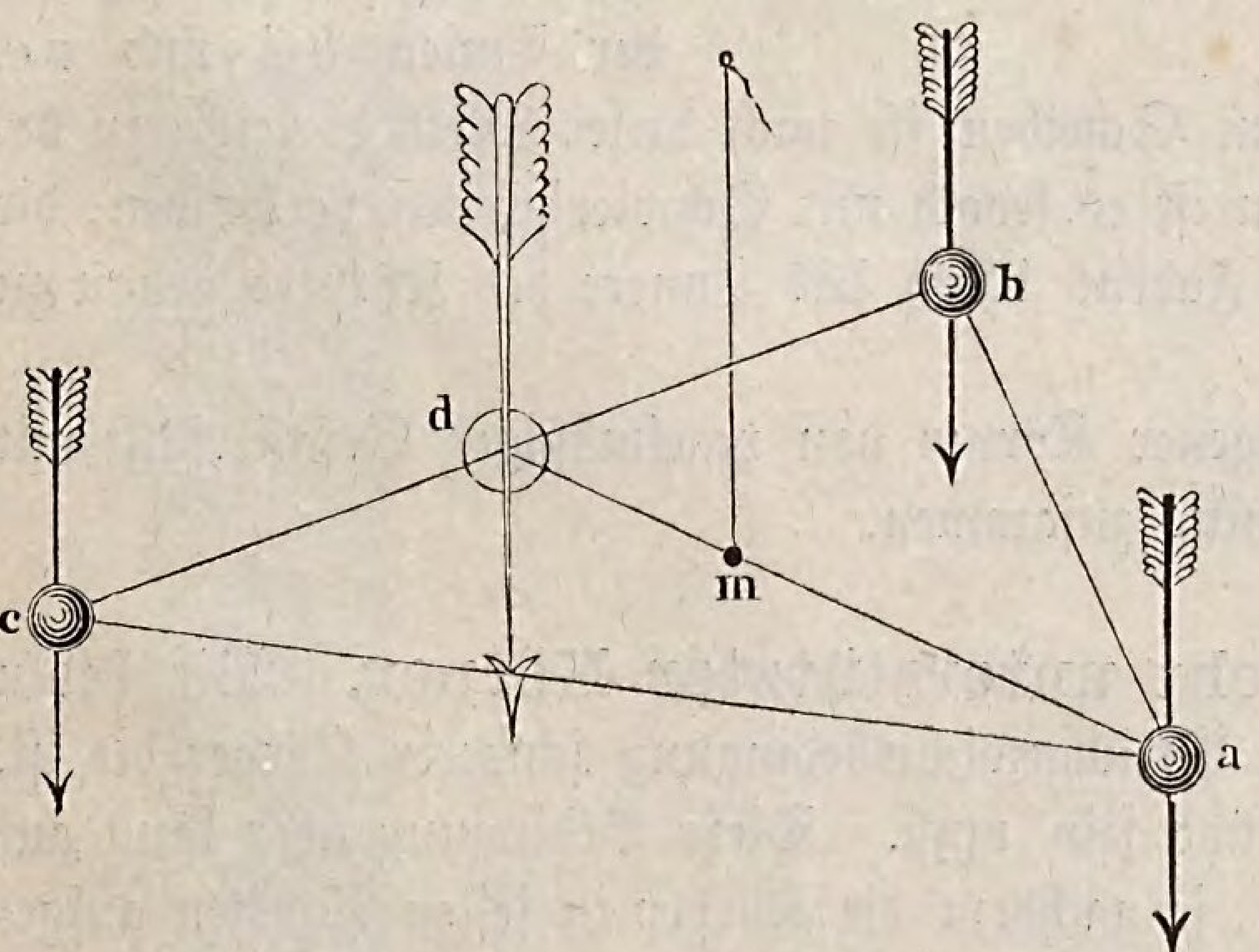
so folgt aus den Hebelgesetzen, daß Gleichgewicht stattfinden muß, sobald nur der in der Mitte zwischen a und b liegende Punkt c unterstützt ist, welchen Winkel auch die Linie ab mit der Horizontalen bilden mag. Findet also Gleichgewicht Statt, wenn der Hebel die Lage ab hat, so bleibt es auch noch bestehen, wenn man ihn in die Lage $a'b'$ bringt. Der Punkt c ist der Schwerpunkt des aus den beiden schweren Molekülen a und b bestehenden Körpers. Ohne das Gleichgewicht zu stören, kann man die Schwerkraft der beiden Moleküle im Schwerpunkte c vereinigt denken.

Fig. 38.



In jedem der drei Eckpunkte eines starren, gewichtlosen Dreieckes abc, Fig. 39, befinde sich ein Molekül, welches durch die Schwere mit einer Kraft p herabgezogen wird. Ohne das Gleichgewicht zu stören, können nun aber die beiden in c und b angreifenden Kräfte durch eine Kraft $2p$ ersetzt werden, welche in dem Halbirungspunkte d der Linie bc angreift. Die Resultirende der in d angreifenden Kraft $2p$ und der in a angreifenden Kraft p geht aber jedenfalls durch den Punkt m, welcher die gerade Linie da so theilt, daß $ma = 2.dm$. Der Punkt m ist also der Angriffspunkt der Resultirenden der drei in a, b und c angreifenden parallelen Kräfte, welches auch übrigens die Lage des Dreieckes sein mag.

Fig. 39.



Denken wir uns a, b und c seien drei in unveränderlicher gegenseitiger Lage verbundene schwere Moleküle, so ist klar, daß m der Schwerpunkt dieses aus drei Molekülen gebildeten festen Körpers ist.

Gerade so aber, wie sich zeigen läßt, daß ein aus zwei, oder ein aus drei schweren Molekülen gebildeter fester Körper einen Schwerpunkt haben müsse, so

kann man auch einsehen, daß je vier, fünf, sechs ꝛc. fest verbundene Moleküle einen solchen Schwerpunkt haben müssen, daß endlich jeder feste Körper einen unveränderlichen Schwerpunkt haben muß, wie groß auch die Anzahl der Moleküle sein mag, aus denen er besteht.

Damit ein schwerer Körper im Gleichgewicht sei, braucht also nur eine einzige Bedingung erfüllt zu sein, nämlich die, daß sein Schwerpunkt unterstützt ist. Ein Körper, für welchen diese Bedingung erfüllt ist, befindet sich im Gleichgewicht, welches im Uebrigen auch seine Lage sein mag.

Aus diesen Betrachtungen läßt sich eine Methode ableiten, den Schwerpunkt der Körper durch den Versuch zu finden. Man hänge den Körper an einem Punkte *a* auf, Fig. 40, so wird die Verlängerung des den Körper tragenden Fadens in einem Punkte *c* aus dem Körper austreten. Auf der Linie *ac* muß nothwendig der Schwerpunkt liegen. Hängt man den Körper in einem zweiten Punkte *b*, Fig. 41, auf, so muß der Schwerpunkt abermals auf der Verlängerung des Fadens, also auf der Linie *bd*, liegen; der Schwerpunkt liegt also auf dem Durchschnittspunkte der Linien *bd* und *ac*.

Fig. 40.

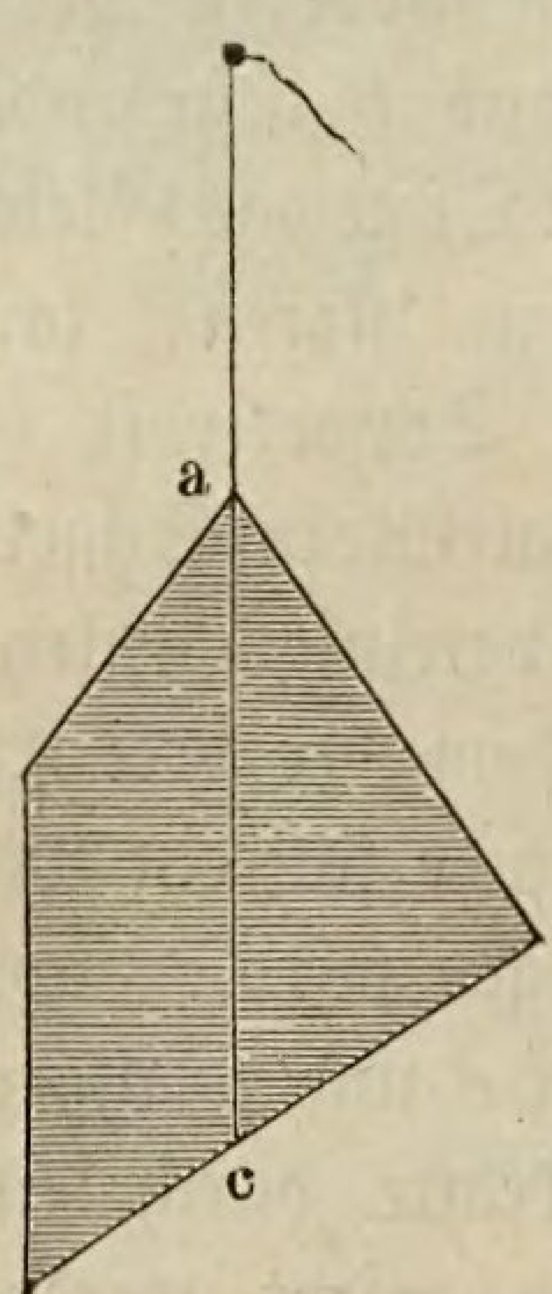
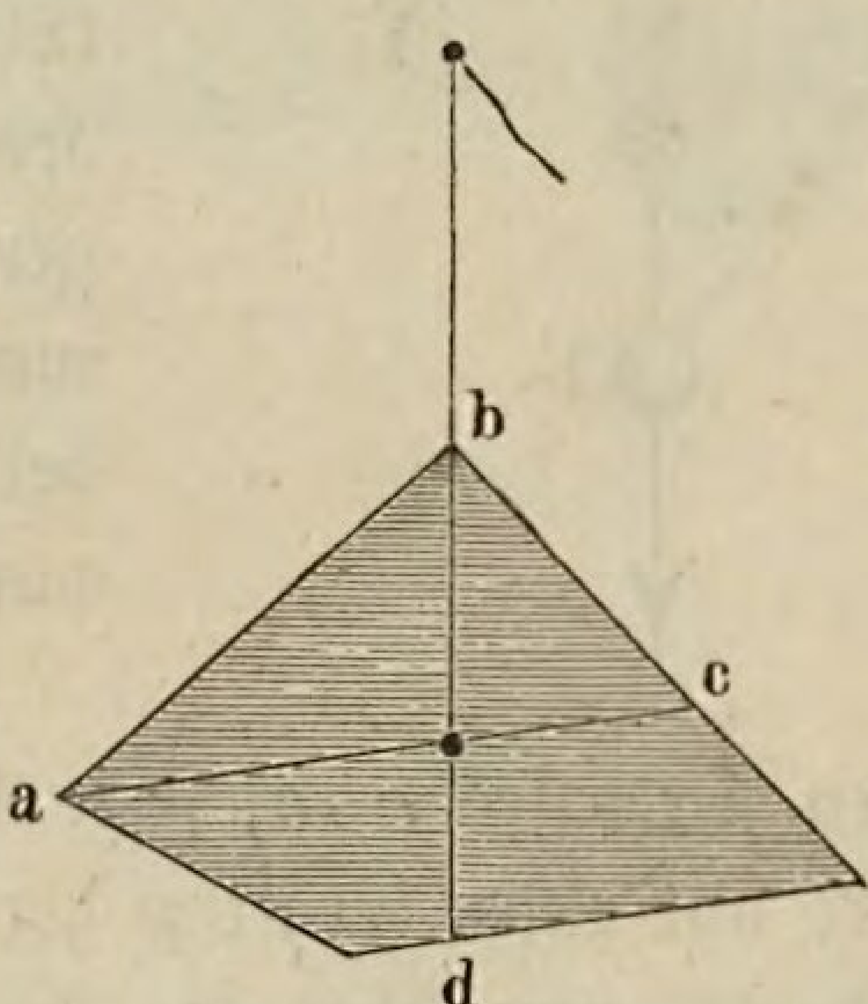


Fig. 41.



Der Schwerpunkt von ebenen Scheiben ist nach dieser Methode leicht zu bestimmen; bei anderen Körpern ist es jedoch mit Schwierigkeiten verbunden, die Verlängerung des verticalen Fadens durch das Innere des Körpers genau zu verfolgen.

Der Schwerpunkt homogener Körper von regelmäßiger Gestalt fällt mit ihrem geometrischen Mittelpunkte zusammen.

26 **Vom Gleichgewicht unterstützter Körper.** Wir haben schon gesehen, daß die einzige Gleichgewichtsbedingung schwerer Körper die ist, daß ihr Schwerpunkt unterstützt sein muß. Diese Bedingung aber kann auf verschiedene Weise erfüllt sein, je nachdem die Körper in festen Punkten aufgehängt sind oder auf Unterstützungsflächen ruhen.

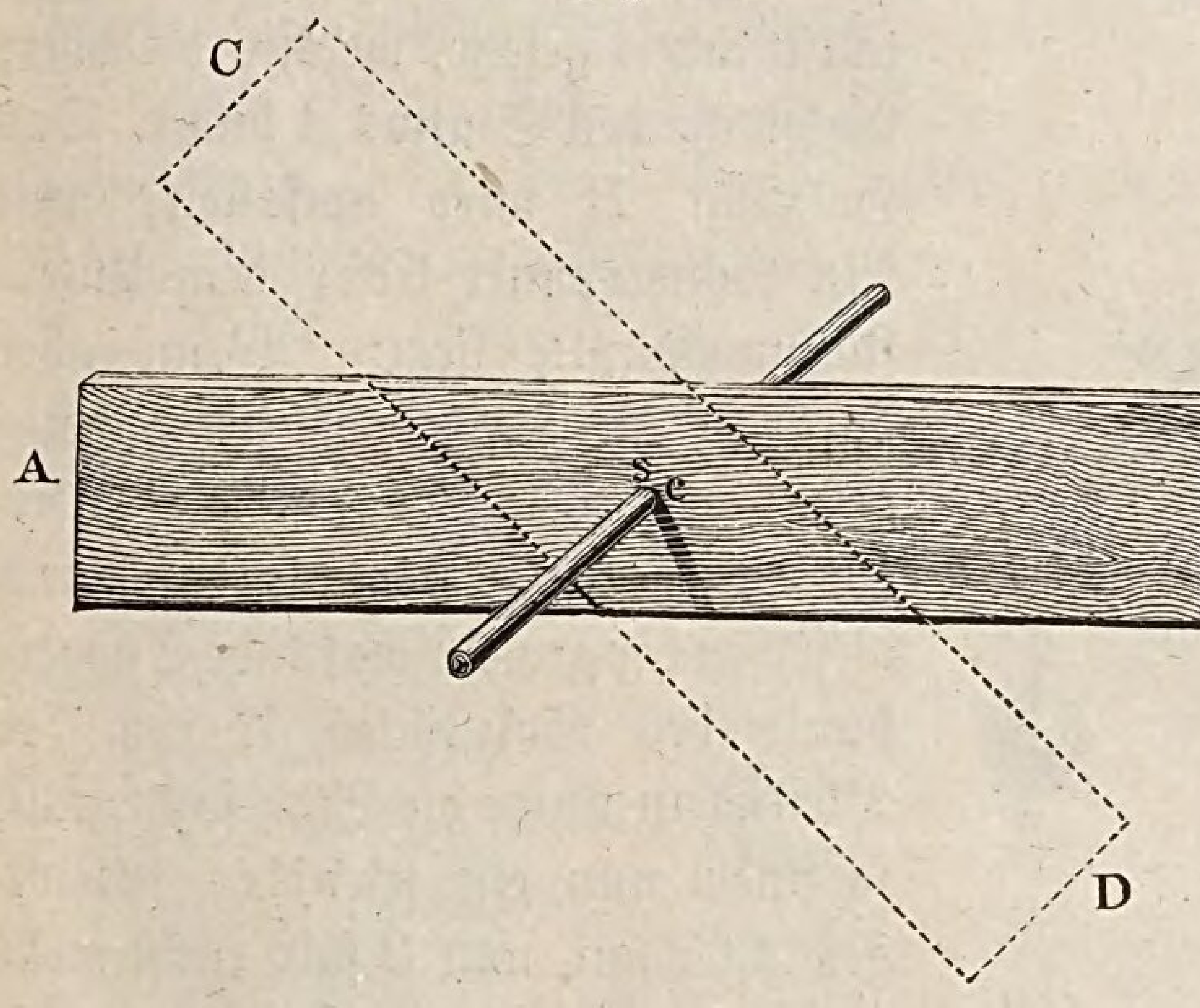
Betrachten wir zunächst einen Körper, der in einem festen Punkte gleichsam aufgehängt ist, um welchen er sich frei drehen kann, so ist er nur dann im Gleichgewichte, wenn sein Schwerpunkt *s* mit jenem festen Drehpunkte *c* in einer Verticallinie liegt. Was die gegenseitige Lage dieser Punkte betrifft, so sind folgende drei Fälle möglich:

1) der feste Punkt *c* (die feste Drehungsaxe) geht durch den Schwerpunkt des Körpers selbst hindurch, wie dies z. B. Fig. 42 darstellt. In diesem Falle

liegen s und c jedenfalls in einer Verticalen, welche Lage man übrigens auch dem Körper giebt; es findet also Gleichgewicht Statt, wie er auch gestellt sein mag, für die Stellung AB also ebenso gut wie für die Stellung CD.

Es ist dies der Fall des indifferenten Gleichgewichtes.

Fig. 42.



2) Der Schwerpunkt s liegt vertical unter dem Drehpunkt c, Fig. 43. Dreht man den Körper aus dieser Lage heraus, so daß etwa der Schwerpunkt nach s' kommt, so führt die Schwerkraft den Körper wieder in die Gleichgewichtslage zurück, sobald die störende Kraft zu wirken aufhört. Ein solches Gleichgewicht wird ein festes oder stabiles genannt.

3) Der Schwerpunkt s des Körpers liegt vertical über dem Drehpunkte, wie Fig. 44, alsdann befindet sich der Körper im Zustande des labilen oder unsicheren Gleichgewichts; denn wenn die geringste störende Kraft den Körper aus dieser Lage

Fig. 43.

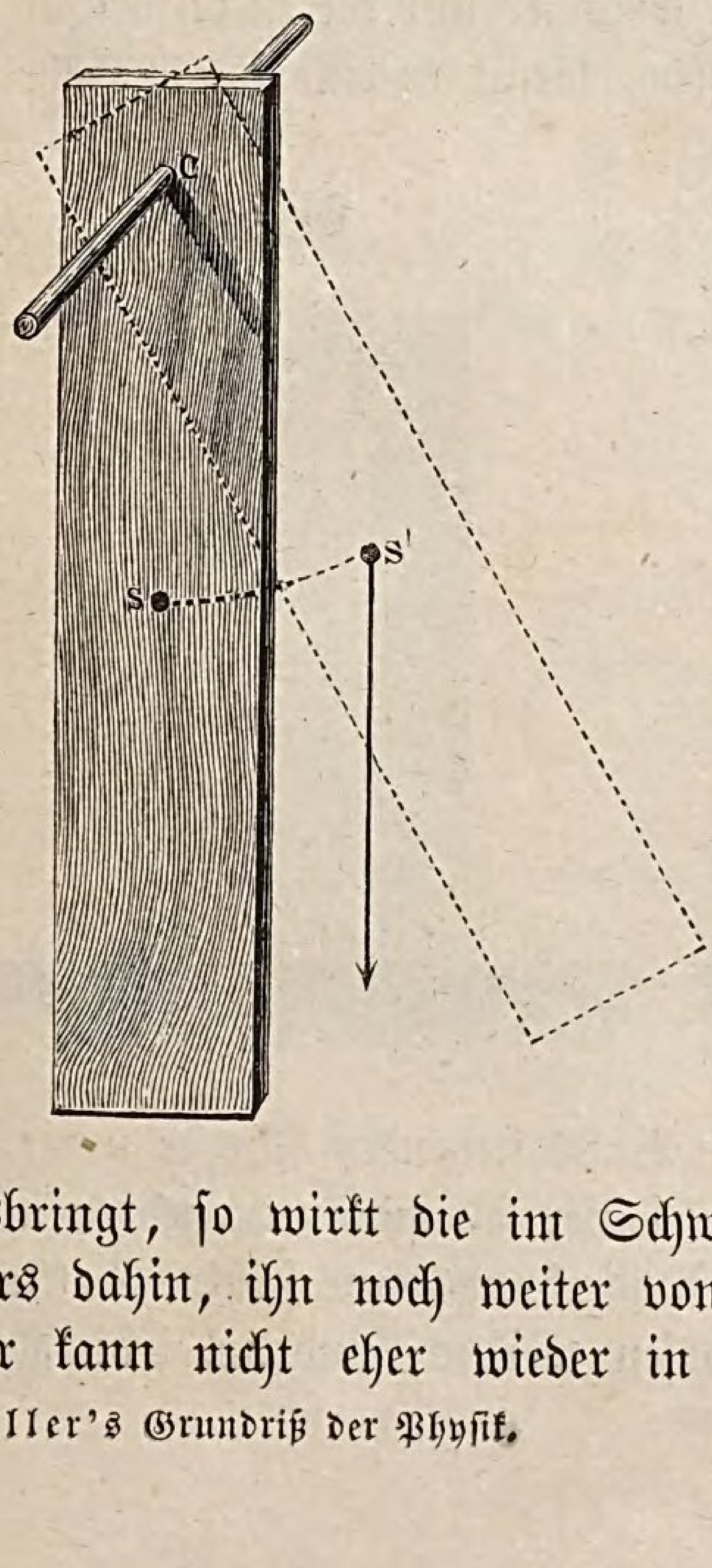
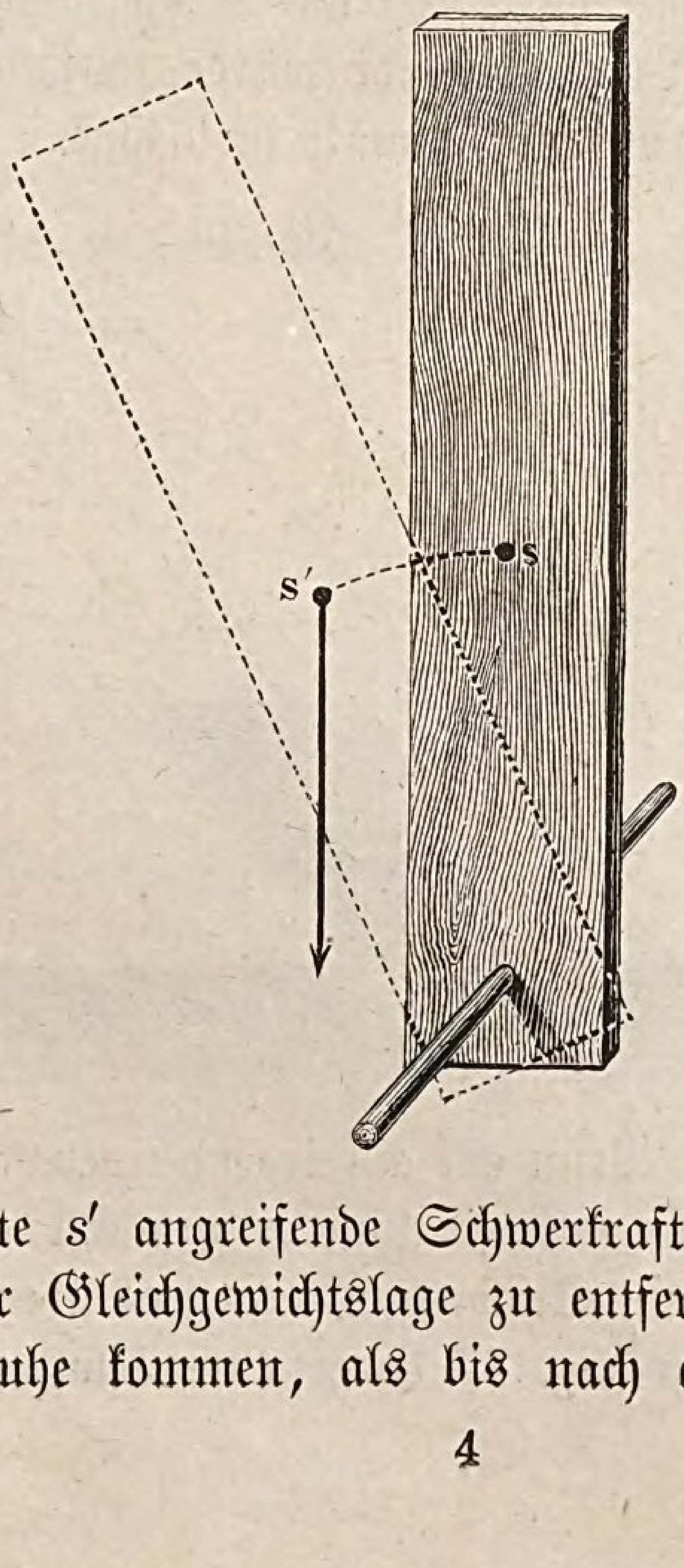


Fig. 44.



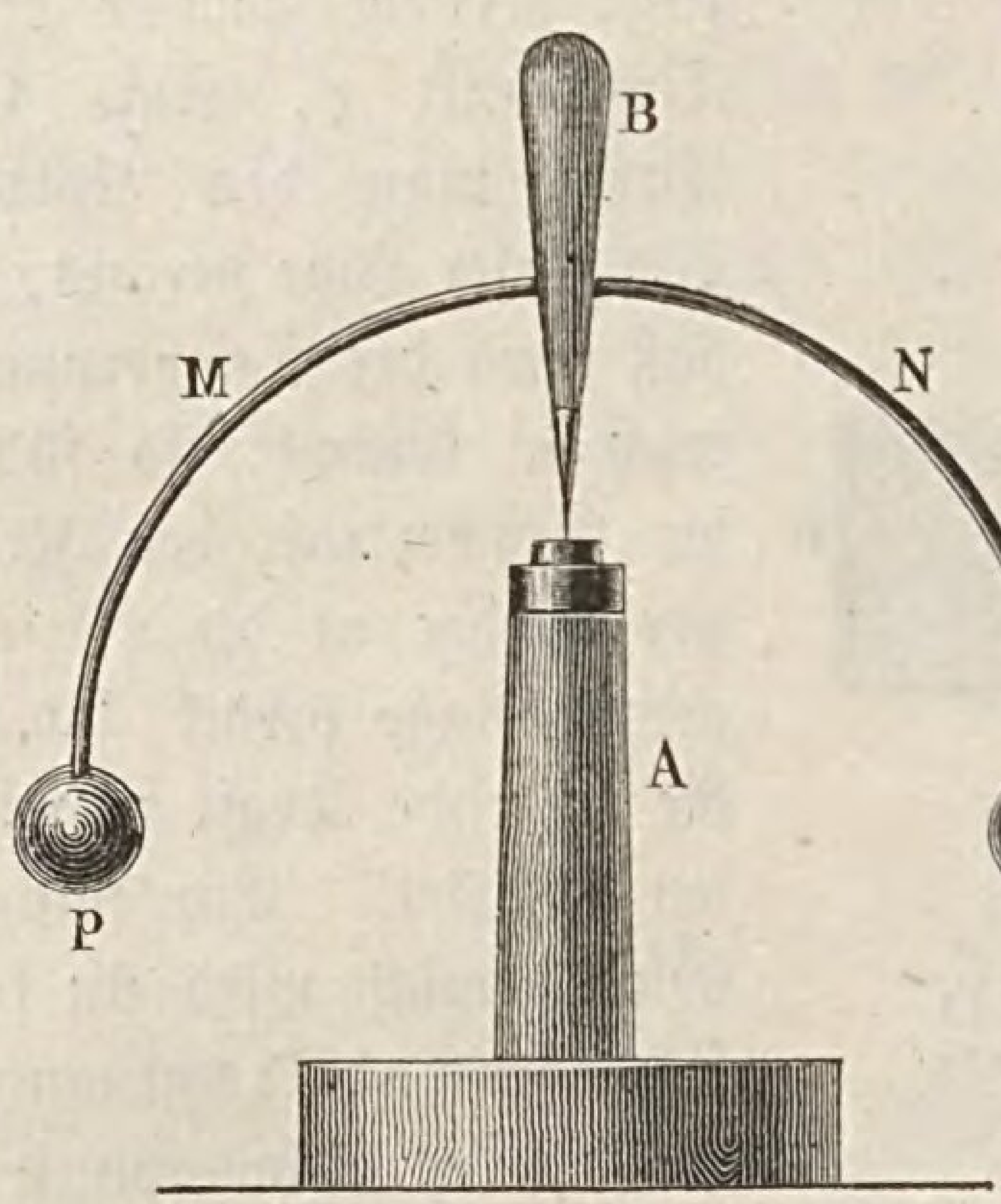
herausbringt, so wirkt die im Schwerpunkte s' angreifende Schwerkraft des Körpers dahin, ihn noch weiter von seiner Gleichgewichtslage zu entfernen, und er kann nicht eher wieder in die Ruhe kommen, als bis nach einer

halben Umdrehung der Schwerpunkt vertical unter dem Drehpunkt angekommen ist.

Einen interessanten Fall des stabilen Gleichgewichts zeigt Fig. 45.

Ein Holzstück *B*, welches unten mit einer Stahlspitze versehen ist, sei mit dieser auf ein flach ausgehöhltes Metallstückchen gesetzt, welches die obere Endfläche des Stativs *A* bildet. Das Holzstück *B* wird umfallen, weil sein Schwerpunkt über dem Unterstützungspunkte liegt. Wenn aber durch *B* ein Drahtbogen *MN* gezogen wird, welcher an beiden Enden die Bleikugeln *p* trägt, so daß durch dieselben der gemeinschaftliche Schwerpunkt des Holzstückes *B* und der Bleikugeln unter die Stahlspitze fällt, so findet nun ein stabiles Gleichgewicht Statt, und *B* fällt nicht mehr um; der Körper ist jetzt eigentlich aufgehängt.

Fig. 45.



Wenn ein Körper mit mehr oder weniger breiter Basis auf dem Boden steht, so muß die durch seinen Schwerpunkt gezogene Verticale noch die Basis selbst treffen, wenn Gleichgewicht stattfinden soll. Demnach wird der schiefe Cylinder (Fig. 46) im Gleichgewichte sein, wenn er nur die in der Figur schattirte Länge hat; er würde umfallen müssen, wenn er eine solche Höhe hätte, daß sein Schwerpunkt in *b* läge.

Fig. 46.

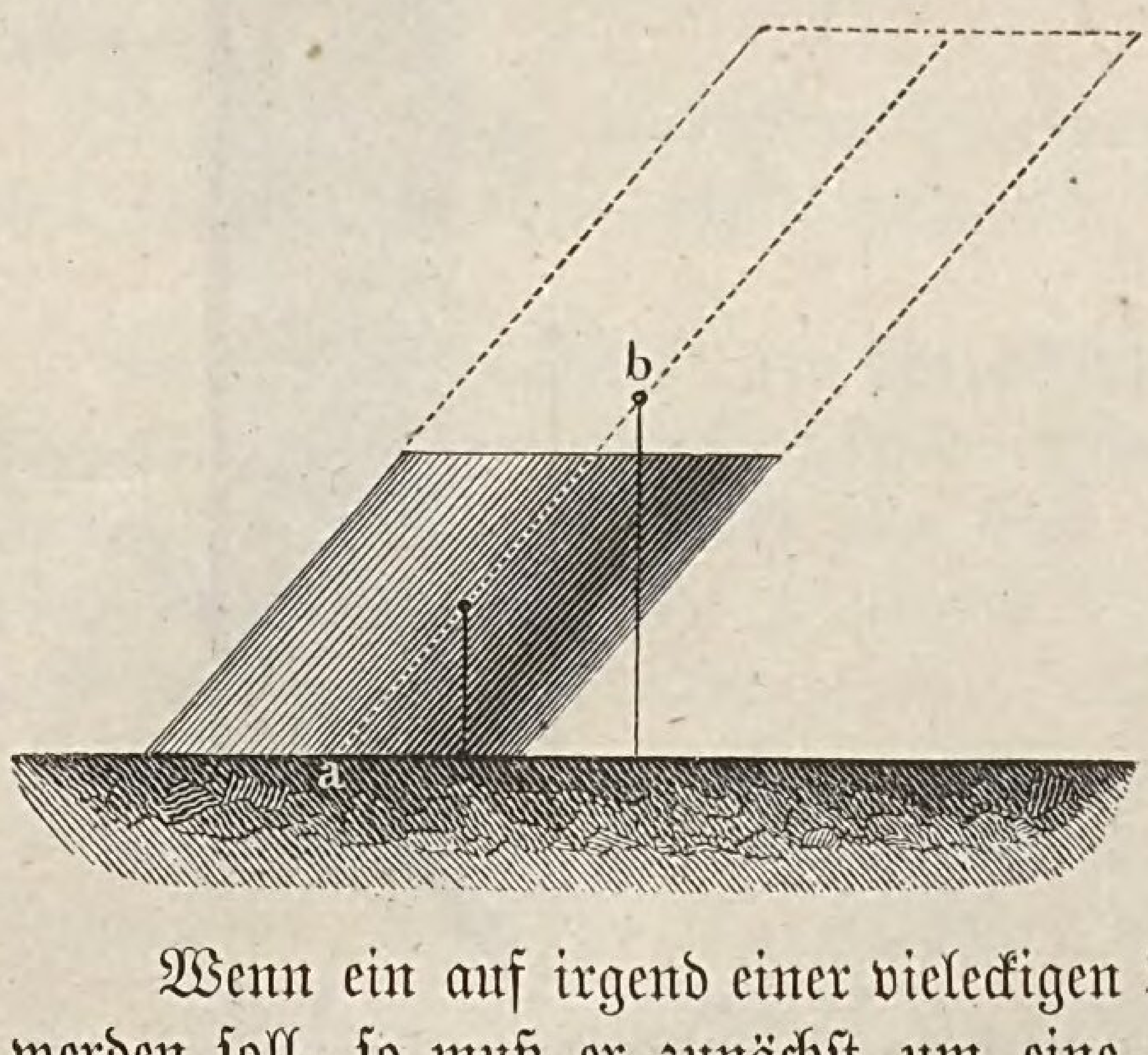
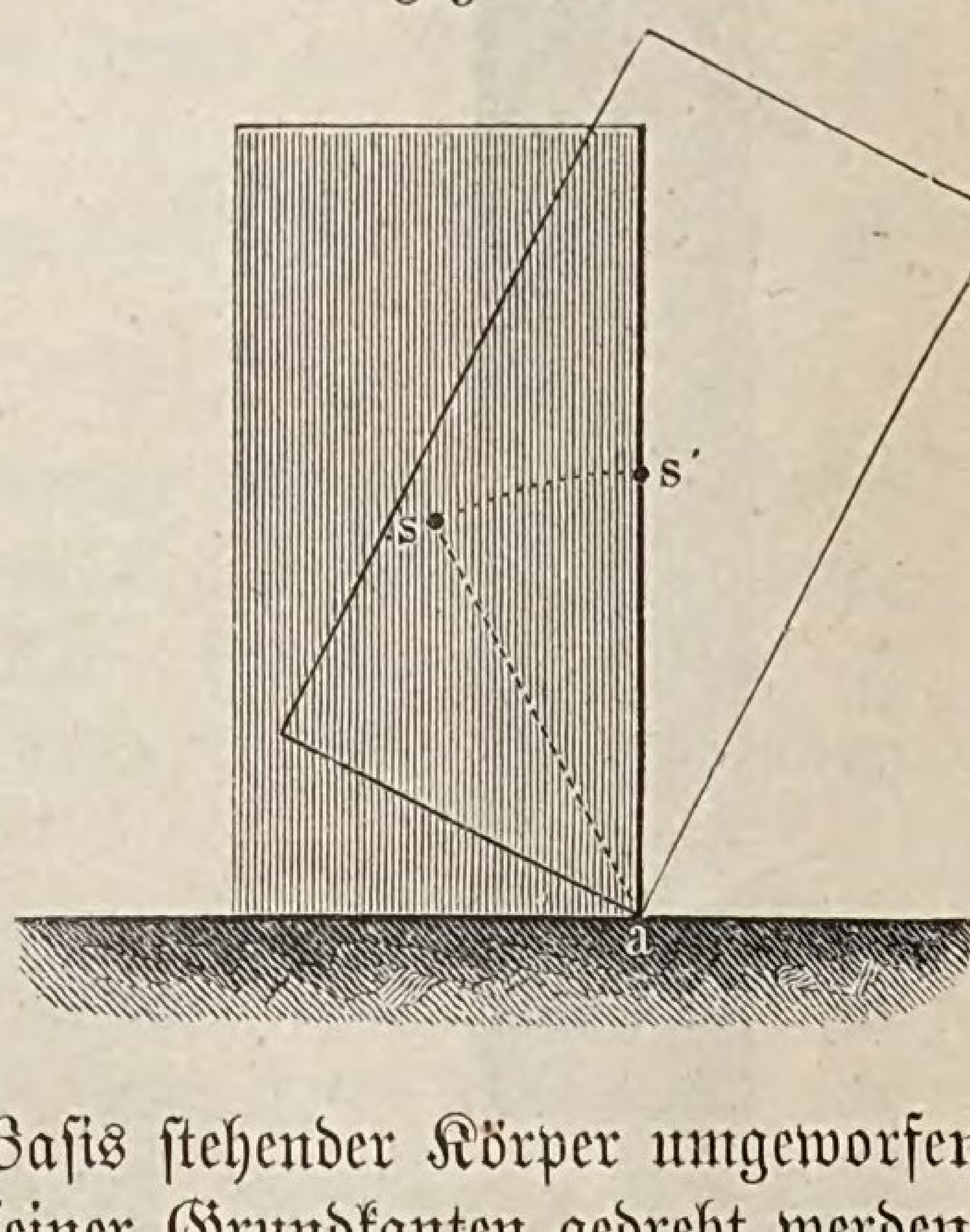


Fig. 47.



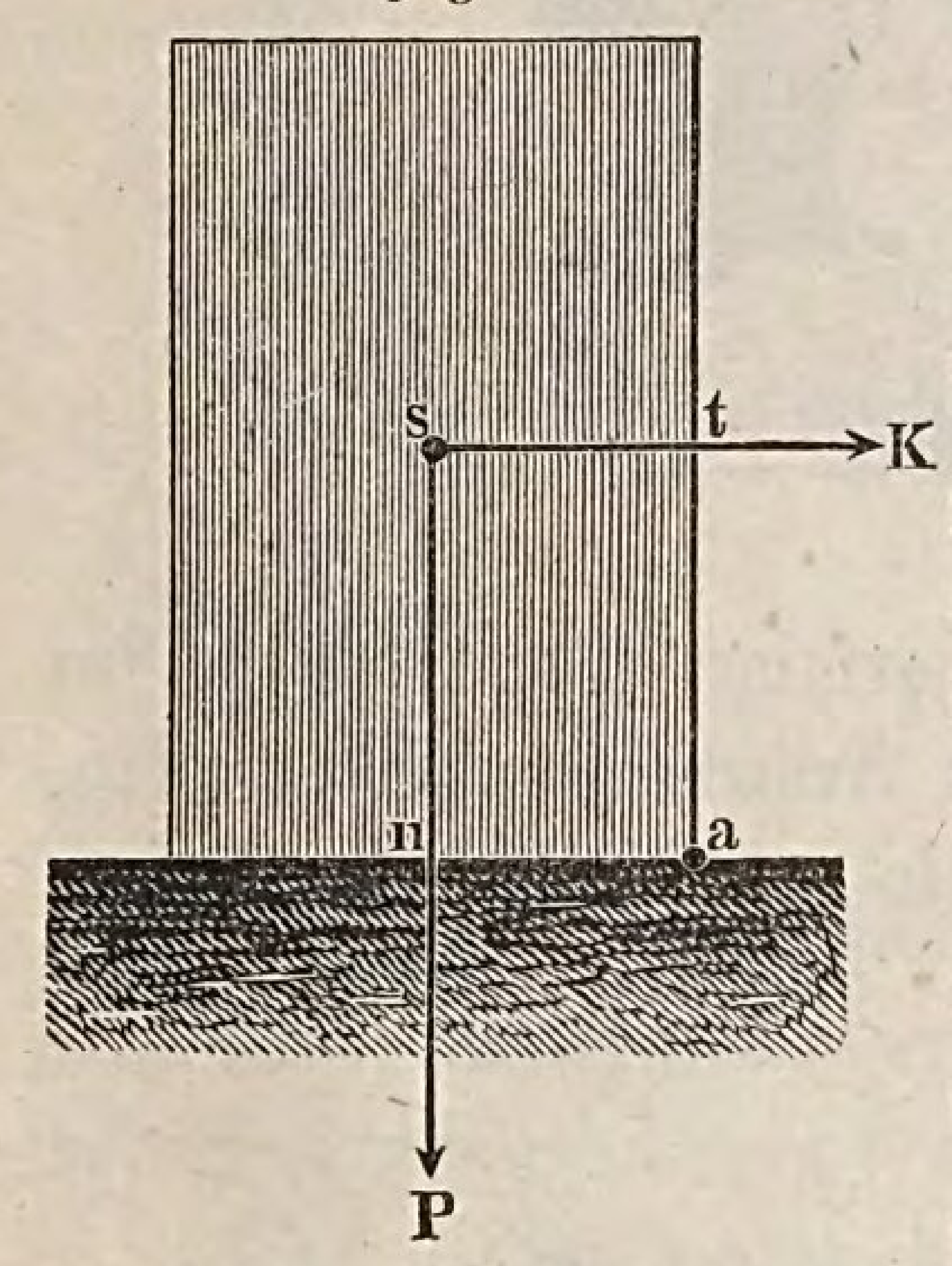
Wenn ein auf irgend einer vieleckigen Basis stehender Körper umgeworfen werden soll, so muß er zunächst um eine seiner Grundkanten gedreht werden, bis sein Schwerpunkt vertical über dieser Umdrehungskante steht. Sollte z. B. der in Fig. 47 dargestellte Klotz umgeworfen werden, und dabei die Kante *a*

die Umdrehungskante sein, so hätte man zunächst den Klotz so lange zu drehen, bis der Schwerpunkt s in die Lage von s' kommt; ließe die Kraft, welche das Umwerfen bewirken soll, eher nach, als der Schwerpunkt in s' angekommen ist, so würde der Klotz in seine ursprüngliche Lage zurückfallen; dagegen fällt der Körper ganz von selbst um, sobald der Schwerpunkt im Mindesten seine höchste Lage s' überschritten hat.

Ein Körper steht um so fester, d. h. seine Stabilität ist um so größer, je größer die Kraft ist, welche man anwenden muß, um ihn aus seiner Gleichgewichtslage herauszubringen.

In Fig. 48 sei s der Schwerpunkt des Körpers, welcher um a umgekantet werden soll. Das Gewicht desselben P sei dargestellt durch den Pfeil

Fig. 48.



sP; ferner bezeichne der Pfeil sK die im Schwerpunkte s in horizontaler Richtung angreifende Kraft K, welche zum Umwerfen des Körpers erfordert wird und somit das Maaß seiner Stabilität ist. Die beiden Kräfte P und K suchen den Körper im entgegengesetzten Sinne um die Kante a zu drehen; der Körper kann mithin als ein zweiarmiger Hebel betrachtet werden, welcher sich im Gleichgewicht befindet, wenn die statischen Momente der Kräfte P und K in Bezug auf den Drehpunkt einander gleich sind. Die Strecken an und at, welche von dem Drehpunkte a senkrecht auf die Richtungen der Kräfte P und K gezogen sind, stellen die Hebelarme dar. Für den Fall des Gleichgewichts ist also

$$K \cdot at = P \cdot an$$

oder, wenn man den verticalen Abstand at des Schwerpunktes von der Drehungskante mit h, den horizontalen mit b bezeichnet,

$$K = P \cdot \frac{b}{h} \cdot$$

Die Stabilität eines Körpers ist demnach dem horizontalen Abstand seines Schwerpunktes direct und der Höhe des Schwerpunktes über der Unterstützungsfläche umgekehrt proportional.

Ein Körper steht demnach um so fester, je breiter seine Unterstützungsfläche ist und je tiefer sein Schwerpunkt liegt. Ein vierfüßiges Thier steht fest, wenn der Schwerpunkt seines ganzen Körpers über dem Viereck liegt, welches auf dem Boden durch seine vier Füße bezeichnet ist. Ein Mensch, welcher Lasten trägt, muß seine Haltung je nach der Art des Tragens richten. Trägt er die Last auf dem Rücken (Fig. 49 a. f. S.), so muß er sich vorbeugen, trägt er sie in der linken Hand (Fig. 50 a. f. S.), so muß er den Oberkörper rechts neigen, denn sonst läge der gemeinschaftliche Schwer-

punkt des menschlichen Körpers und der getragenen Last außerhalb der Verbindungslinie der Füße, und der Lastträger müßte umfallen.

Fig. 49.

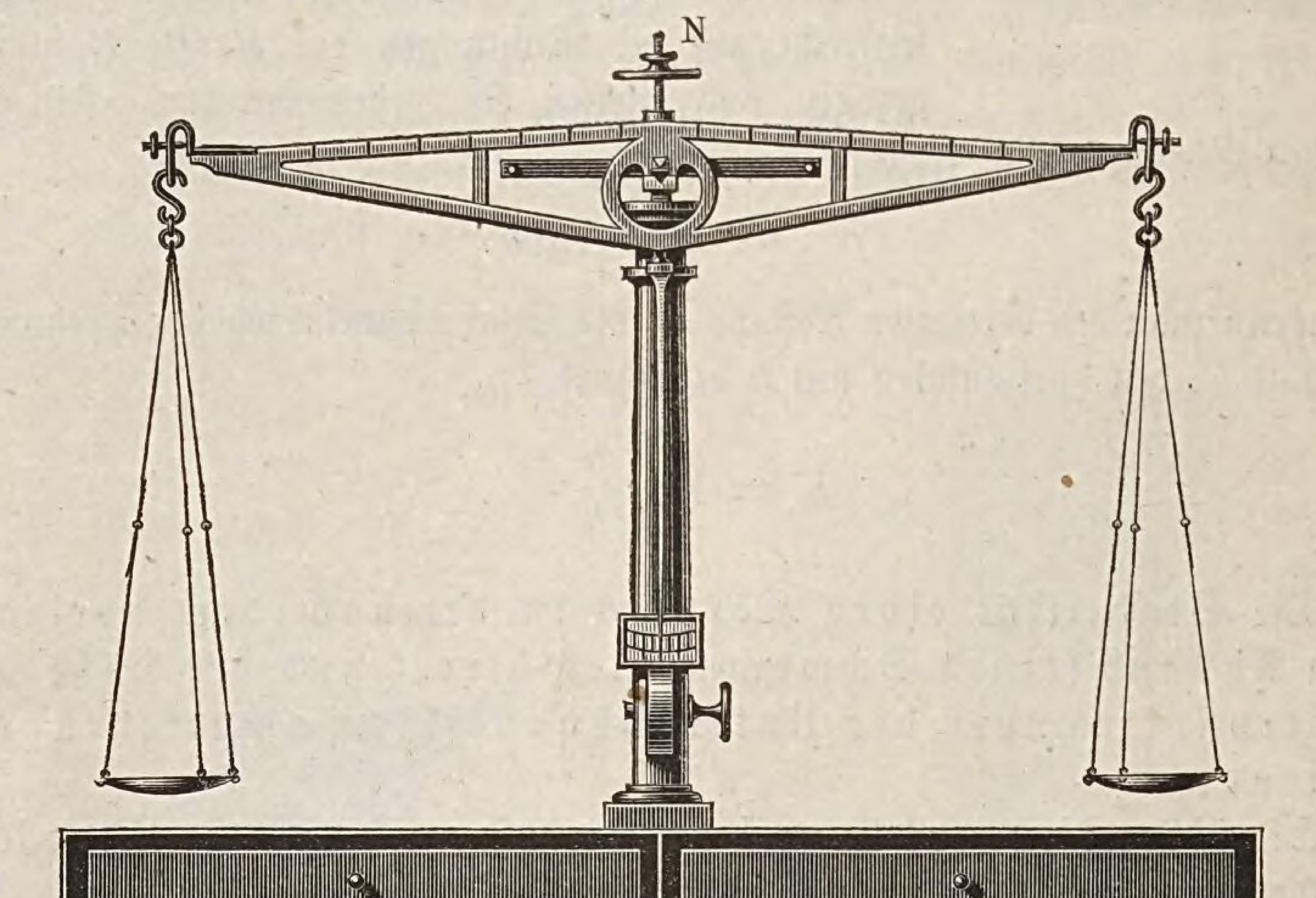


Fig. 50.



27 **Die gleicharmige Wage.** Die gleicharmige Wage besteht im Wesentlichen aus einem Hebel mit zwei gleich langen Armen, dem Wagbalken, welcher sich um eine horizontale Axe drehen kann, die rechtwinklig zur Längs-

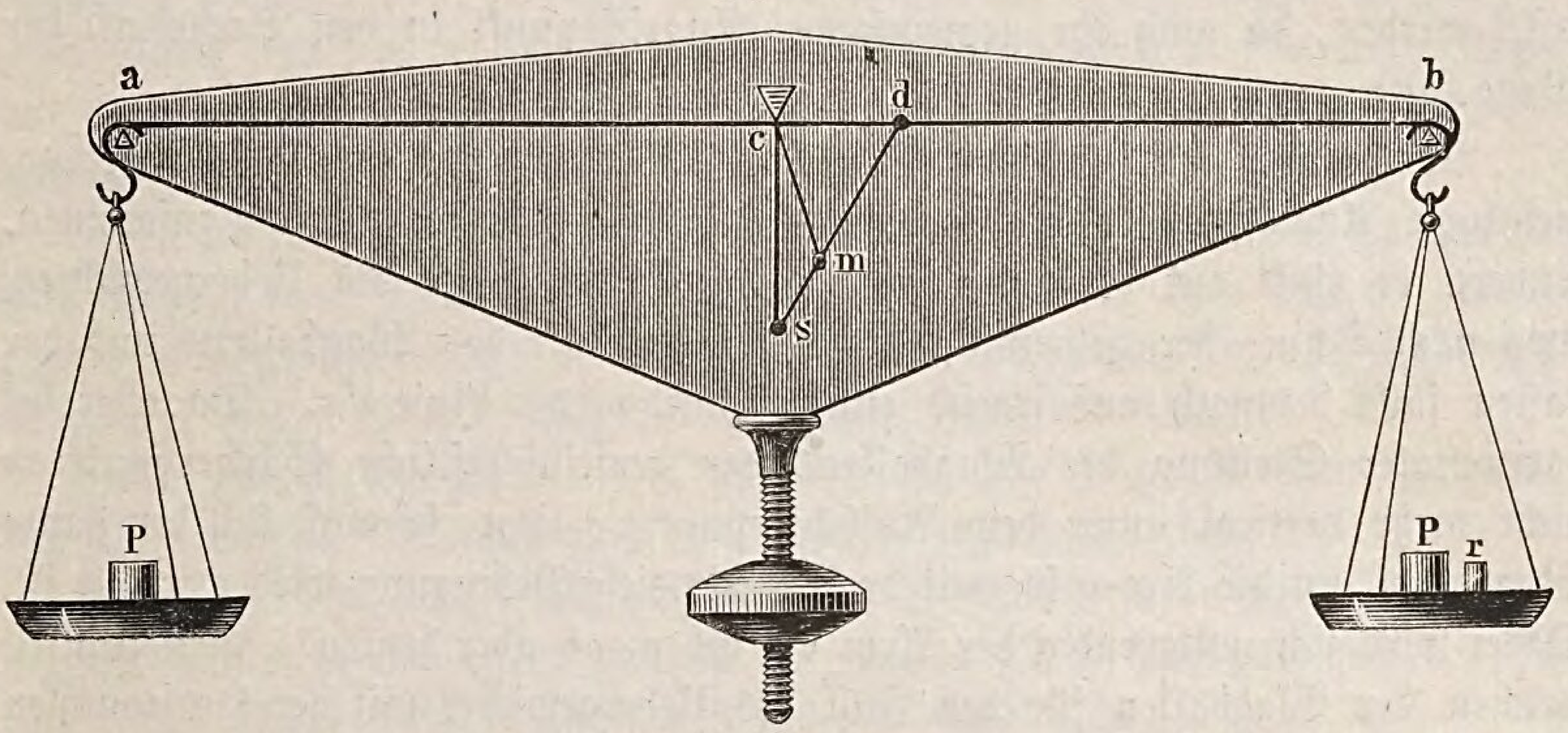
Fig. 51.



richtung des Wagbalkens befestigt ist und in Form einer abwärts gerichteten Schneide von gehärtetem Stahl auf einer gleichfalls sehr harten Unterlage von Stahl oder Achat aufliegt. Auf beiden Seiten des Wagbalkens hängen die Wagschalen, welche zur Aufnahme des zu wägenden Körpers und der Gewichte

dienen. Die Aufhängepunkte der Wagschalen sind gleichfalls durch horizontale senkrecht zur Länge des Wagbalkens angebrachte, jedoch nach oben gerichtete Schneiden von Stahl gebildet. Die Verbindungslinie ab der beiden Aufhängepunkte a und b (Fig. 52) kann entweder über, oder unter, oder durch den Drehpunkt des Wagbalkens gehen. Der letzte dieser drei Fälle ist sowohl für die Betrachtung der einfachste, als auch für die praktische Ausführung der zweckmäßigste;

Fig. 52.



wir werden uns deshalb auf die Betrachtung dieses Falles beschränken und somit annehmen, der Drehpunkt c der Wage liege im Halbirungspunkte der Verbindungslinie ab der Aufhängepunkte der Wagschalen.

Die Bedingungen, denen eine richtige Wage zu genügen hat, sind:

1) der unbelastete Wagbalken muß eine vollkommen horizontale Lage annehmen;

2) bei gleicher Belastung der Wagschalen muß der Wagbalken seine horizontale Lage behalten;

3) bei Auflegung eines Uebergewichtes auf der einen Seite muß sich der Wagbalken auf dieser Seite neigen.

Wir wollen nun untersuchen, durch welche Einrichtung den eben ausgesprochenen Forderungen Genüge geleistet werden kann. Denken wir uns vorerst die Wagschalen noch weg, und nehmen wir an, der Wagbalken sei in seinem Schwerpunkte unterstützt, so haben wir den Fall eines indifferenten Gleichgewichts; der Wagbalken wird bei jeder beliebigen Neigung gegen die Horizontale im Gleichgewicht sein. Eine solche Vorrichtung erfüllt also die erste Forderung nicht, daß der Wagbalken für sich, ohne Belastung an den Enden, eine horizontale Lage annehmen muß. Dieser Forderung kann nur dadurch genügt werden, daß der Schwerpunkt s des Wagbalkens so unter seinem Drehpunkt c liegt, daß die Verbindungslinie cs des Drehpunktes mit dem Schwerpunkte senkrecht auf der Verbindungslinie ab der Aufhängepunkte der Wagschalen steht.

Werden dann an den Wagbalken zwei gleich schwere Wagschalen angehängt, so wird die horizontale Lage des Wagbalkens nicht geändert; denn, da das Gewicht einer jeden Schale in ihrem Aufhängepunkt angreift, so liegt der

gemeinsame Angriffspunkt der Schalen, weil sie gleich schwer sind, in dem Halbirungspunkte *c* der Verbindungslinie der Aufhängepunkte. Da aber dieser Punkt mit dem Drehpunkte der Wage zusammenfällt, so wird die Mittelkraft der Schalengewichte aufgehoben, ohne irgend eine Aenderung in der drehenden Bewegung des Wagbalkens hervorzubringen.

Aus demselben Grunde muß der Wagbalken seine horizontale Lage behaupten, wenn die beiden Wagschalen mit zwei gleich schweren Gewichten belastet werden, da auch ihr gemeinsamer Angriffspunkt in den Drehpunkt der Wage fällt.

Bringt man auf der einen Seite ein Uebergewicht *r* an, so fällt der gemeinsame Angriffspunkt der angehängten Lasten nicht mehr mit *c* zusammen, sondern er rückt auf der Linie *ab* von *c* nach der Seite des Uebergewichtes, etwa nach *d* hin; der gemeinschaftliche Schwerpunkt des Wagbalkens und der Lasten fällt demnach auf irgend einen Punkt *m* der Linie *ds*. Da aber bei horizontaler Stellung des Wagbalkens der gemeinschaftliche Schwerpunkt *m* nicht mehr vertical unter dem Aufhängepunkte *c* liegt, so muß sich der ganze Wagbalken um die Axe *c* so weit drehen, bis diese Bedingung wieder erfüllt ist. Dabei wird sich nothwendig der Arm *ca* heben, *cb* aber senken. Der Winkel, welchen der Wagbalken für den Fall des Uebergewichts mit der Horizontalen macht, heißt Ausschlagswinkel. Er ist gleich dem Winkel *scm*.

Den Bedingungen einer richtigen Wage wird also genügt, wenn

1) der Drehpunkt der Wage im Halbirungspunkte der Verbindungslinie der Aufhängepunkte der Wagschalen liegt,

2) der Schwerpunkt des Wagbalkens bei horizontaler Lage des letzteren vertical unter dem Drehpunkte liegt,

3) die beiden Wagschalen gleich schwer sind.

Wir wollen nun untersuchen, wie eine Wage eingerichtet sein muß, damit sie recht empfindlich sei, d. h. damit sie schon bei einem kleinen Uebergewicht einen großen Ausschlag gebe.

1) Der Schwerpunkt des Wagbalkens muß möglichst nahe unter dem Aufhängepunkte liegen; denn wenn bei übrigens unveränderten Umständen der Schwerpunkt *s* des Wagbalkens in die Höhe gerückt wird, so rückt auch der Punkt *m* vertical nach oben, was offenbar eine Vergrößerung des Winkels *scm* zur Folge hat. Bei guten Wagen hat man eine Vorrichtung angebracht, welche eine Regulirung der Lage des Schwerpunktes möglich macht. In der Verlängerung der Linie *cs* ist nämlich eine feine Schraube angebracht, an welcher ein den Umständen entsprechendes Gewicht auf- und abgeschraubt werden kann, womit offenbar eine Verrückung des Schwerpunktes verbunden ist.

2) Der Wagbalken muß möglichst lang sein. Wenn man, ohne sonst etwas zu verändern, den Wagbalken verlängern könnte, so würde die Entfernung *cd* in demselben Verhältniß größer werden, und der Punkt *m* würde also auch nach einer Richtung, die mit *ab* parallel ist, weiter von der

Linie cs weggerückt werden, die Linie cm würde also einen größeren Winkel mit cs machen, der Ausschlagswinkel würde also wachsen.

3) Der Wagbalken muß möglichst leicht sein. In dem Punkte d können wir uns das Gewicht der Lasten $2P + r$, in s aber das Gewicht des Wagbalkens, welches wir mit g bezeichnen wollen, vereinigt denken. Offenbar hängt nun die Lage des gemeinschaftlichen Schwerpunktes m von der Größe der an den Enden der Linie ds wirkenden Kräfte ab. Wenn das in s wirkende Gewicht g und das in d wirkende $2P + r$ einander gleich wären, so fiele m in die Mitte von ds; je kleiner aber g im Vergleich zu $2P + r$ wird, desto mehr muß m nach d hinrücken, und desto größer wird dann begreiflicherweise der Ausschlag.

Was nun die beiden letzten Punkte betrifft, so ist man doch an gewisse Gränzen gebunden, welche man nicht überschreiten darf, ohne daß die Wage wegen der zu großen Länge des Wagbalkens zu unbequem für den Gebrauch würde, oder wegen ihrer Leichtigkeit die nöthige Festigkeit verlöre.

Man wendet durchbrochene Wagbalken an, wie Fig. 51 Seite 52, um ihnen bei geringem Gewichte doch möglichste Festigkeit zu geben.

Es versteht sich von selbst, daß man bei der Construction einer Wage alle Sorgfalt darauf zu verwenden hat, die Wagbalken gleich lang zu machen. Da jedoch kleine Fehler nicht zu vermeiden sind, so muß man durch die Methode der Wägung einen etwaigen Fehler zu corrigiren suchen. Die zweckmäßigste Wägungsmethode möchte in dieser Beziehung wohl folgende sein: Man legt den zu wägenden Körper auf die eine Wagschale, und bringt ihn durch Sand, Schrotkörner oder sonstige Gegenstände, die man auf die andere Wagschale legt, ins Gleichgewicht. Ist dies erreicht, so nimmt man den zu wägenden Körper weg und substituirt statt seiner soviel Gewichte, daß das Gleichgewicht dadurch abermals hergestellt wird. Diese neu aufgelegten Gewichte geben genau das Gewicht des Körpers an, die Wagbalken mögen nun gleich lang sein oder nicht.

Damit eine möglichst geringe Reibung an der Drehungsaxe stattfinde, wird diese durch eine Schneide von Stahl gebildet; auch die Wagschalen sind an solchen Schneiden aufgehängt.

Die Brückenwage. Es möchte wohl hier am Orte sein, auch die 28
zur Wägung größerer Lasten so außerordentlich bequeme Brückenwage zu besprechen.

Fig. 53 (a. f. S.) stellt die Einrichtung der Brückenwage schematisch dar. Die Last L liegt auf einem Brette ba, welches bei a auf einer Schneide ruht, bei b aber an einer Stange E hängt. Die Stange E ist bei b' an dem einen Arme des auf der Schneide K ruhenden Hebels ic' angehängt, den wir den Hebel B nennen wollen.

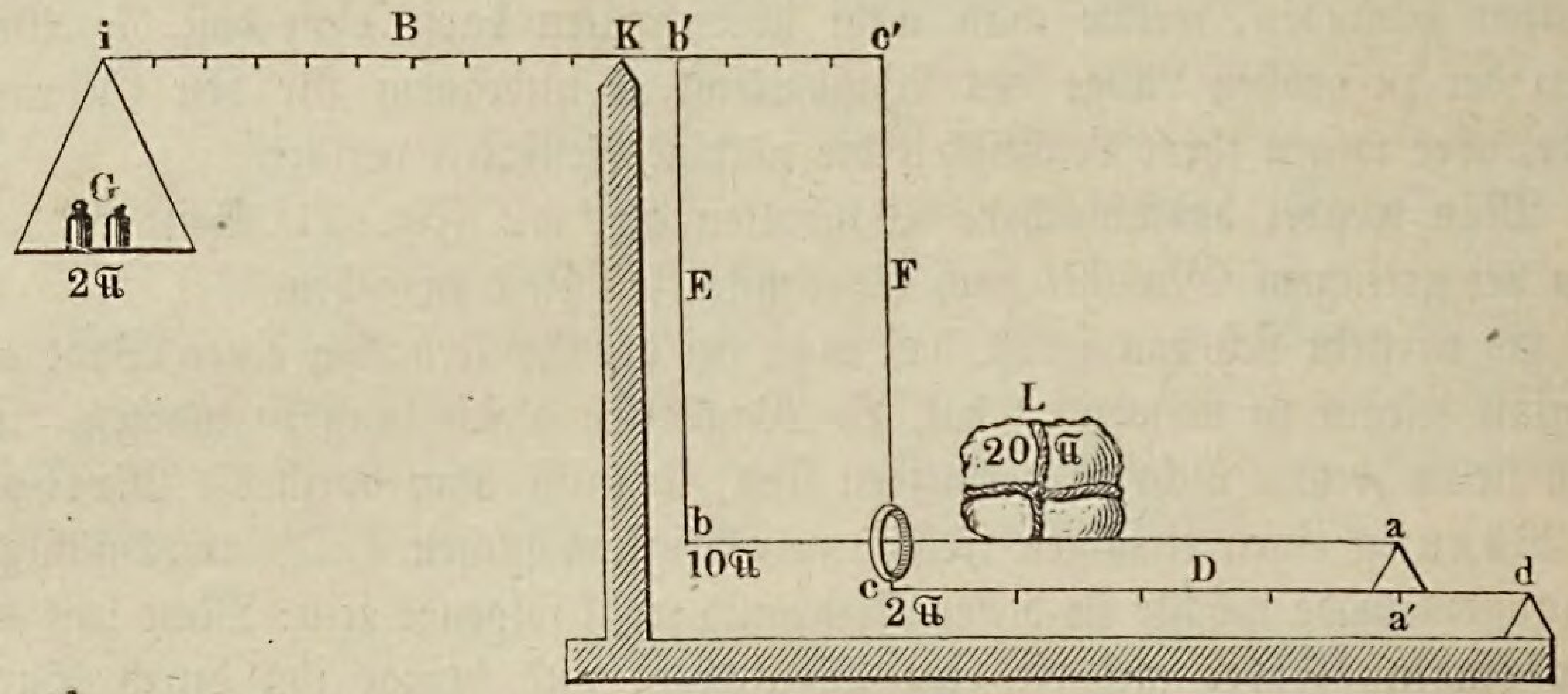
Die Schneide a ruht auf einem einarmigen Hebel D, dessen Drehpunkt bei d ist und dessen anderes Ende c an einer bei c' angehängten Stange F befestigt ist.

Wenn Kb' sich zu Kc' genau ebenso verhält wie da' zu dc, was bei einer guten Brückenwage durchaus der Fall sein muß, so wirkt die auf das Brett ba gelegte Last gerade ebenso, als ob sie unmittelbar an die Stange E angehängt wäre, welche Stelle des Brettes sie auch einnehmen mag.

Es ist dies leicht zu beweisen. Der eine Theil der Last L drückt auf die Schneide a, der andere zieht an der Stange E. Bezeichnen wir mit q den Druck auf die Schneide a, mit p den Zug an der Stange E, so ist $p + q = L$.

Die Last q, welche die Schneide a niederdrückt, wirkt an dem Hebelarme $a'd$; nehmen wir an, es sei $cd = n \,.\, a'd$, so wirkt die in a' drückende Kraft q gerade ebenso, wie eine bei c niederziehende Kraft $\frac{q}{n}$.

Fig. 53.



An dem Hebel B ziehen also rechts von der Schneide K zwei Kräfte, nämlich bei b' die Kraft p, bei c' aber die Kraft $\frac{q}{n}$.

Die Kraft $\frac{q}{n}$, welche in c' angreift, wirkt aber gerade so wie eine n mal größere Kraft, welche bei b' hängt, weil nach der Voraussetzung auch

$$Kc' = n \,.\, Kb',$$

also gerade so, als ob bei b' die Last $\frac{q}{n} \,.\, n = q$ hinge; die beiden Kräfte, welche bei b' und c' angreifen, ziehen also den Hebel gerade ebenso stark nieder, als ob bei b' die Last $p + q = L$ angehängt wäre.

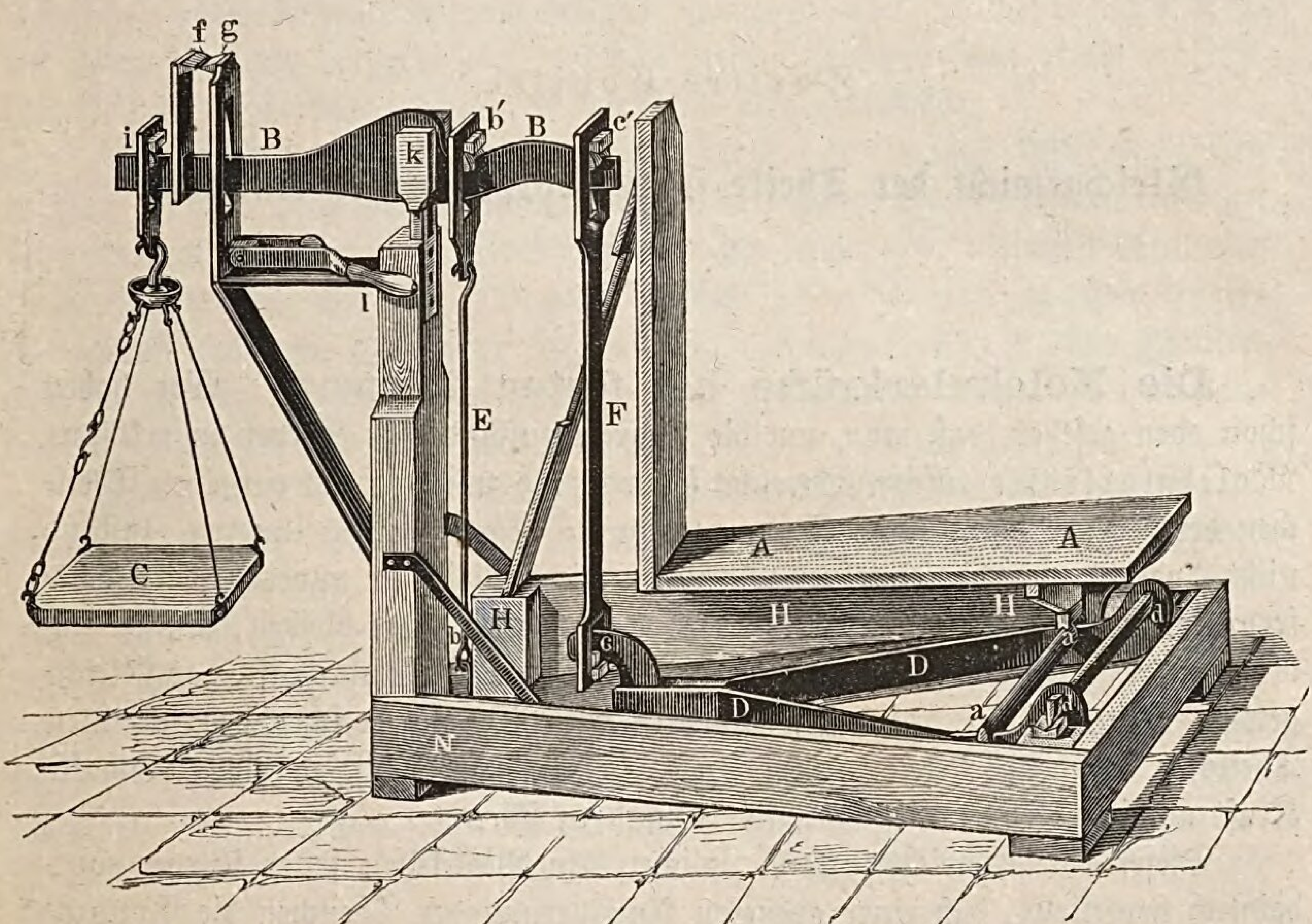
Am linken Ende des Hebels B, bei i, ist die Wagschale angehängt, auf welche die Gewichte gelegt werden. Das Verhältniß zwischen Last und Gewicht hängt ab von dem Verhältniß des Hebelarms Kb' zu Ki. In der Regel sind die Brückenwagen so construirt, daß Kb' ein Zehntel von Ki ist; dann beträgt auch das Gewicht ein Zehntel der Last, man kann also mit 10 Pfund, die auf der Wagschale liegen, einer 100 pfündigen auf der Brücke ab liegenden Last das Gleichgewicht halten. In diesem Falle heißt die Brückenwage **Decimalwage**.

Fig. 54 stellt die Ansicht einer Brückenwage und zwar zum Theil im Durchschnitt dar. Die Buchstaben sind dieselben wie in Fig. 53. Das Brett

A, welches zur Aufnahme der Lasten dient, ist auf einem dreiseitigen hölzernen Rahmen *H* befestigt, von welchem unsere Figur ebenso wie vom Brette *A* nur die hintere Hälfte zeigt. Der Rahmen *H* sitzt hinten auf der Schneide *a* auf und ist vorn bei *b* an die Stange *E* angehängt. Die Schneide *a* ist auf dem gabelförmig gestalteten Hebel *D* befestigt, dessen Drehpunkt hinten durch die Schneide *d* gebildet ist und welcher vorn bei *c* an der Stange *F* hängt.

In unserer Figur ist der Deutlichkeit wegen der Rahmen *H*, auf welchem das Tragbrett *A* befestigt ist, viel zu hoch gezeichnet worden; er ist so niedrig, daß, wenn durch Aufschlagen des Hebels *l* die linke Seite des Hebels *B* gehoben

Fig. 54.



wird, die rechte Seite desselben sich so weit senkt, daß die Brücke *A* auf dem Rande des Gestelles *N* aufsitzt, so daß also die Schneiden *b′* und *c′* nicht mehr die Last der Brücke zu tragen haben. Der Hebel *l* wird nach jedesmaligem Gebrauche aufgeschlagen, damit die Schneiden geschont werden.

Das Gewicht der Brücke ist so abgeglichen, daß es, wenn der Hebel *l* niedergelegt ist, den Wagbalken *B* wagerecht stellt, und so die Schneide *g* genau der Schneide *f* gegenüber zu stehen kommt. Ist die Brücke belastet, so werden so viel Gewichte auf die Wagschale *C* aufgelegt, daß diese Schneiden einander wieder gegenüberstehen.

Zweites Capitel.

Gleichgewicht der Theile fester Körper unter einander.

---

29 **Die Molekularkräfte bei festen Körpern.** Wir haben schon oben gesehen, daß man, um die Aggregatzustände der Körper zu erklären, Molekularkräfte annimmt, welche fortwährend zwischen den einzelnen Theilchen der Körper thätig sind. So lange nun ein Körper seinen inneren Zustand nicht ändert, und die einzelnen Theilchen nicht allein in unveränderter Entfernung, sondern auch in unveränderter gegenseitiger Lage bleiben, müssen sich offenbar die zwischen einzelnen Theilchen wirkenden Molekularkräfte das Gleichgewicht halten. Bei den festen Körpern nun ist das zwischen den einzelnen Theilchen bestehende Gleichgewicht ein stabiles, denn es ist ja eine namhafte Kraft nöthig, um den Gleichgewichtszustand zu stören.

Dieser Gleichgewichtszustand zwischen den Molekülen fester Körper wird dadurch hergestellt, daß einer größeren Annäherung der Theilchen die Expansionskraft, einer Vermehrung ihres gegenseitigen Abstandes aber die Cohäsionskraft entgegenwirkt.

30 **Elasticität.** Wenn die Theilchen eines festen Körpers durch eine äußere Kraft wirklich ein wenig aus ihrer gegenseitigen Lage verrückt worden sind, so ist deshalb der stabile Gleichgewichtszustand doch nicht völlig vernichtet; denn die Theilchen kehren in ihre frühere Lage zurück, wenn die störende Kraft zu wirken aufhört. Diese Eigenschaft der Körper, vermöge deren die Theilchen in ihre frühere Gleichgewichtslage zurückkehren, wenn die durch äußere Kräfte veranlaßte Verschiebung gewisse Gränzen nicht überschritten hat, nennt man Elasticität. Die Elasticität der festen Körper beweist, daß sich die Theilchen in einem stabilen Gleichgewichtszustande befinden; denn nur für den Fall des stabilen Gleichgewichts findet eine Rückkehr zur ursprünglichen Gleichgewichtslage statt, wenn die störenden Kräfte zu wirken aufhören.

Nicht alle Körper sind gleich elastisch; es giebt Körper, deren Theilchen selbst nach bedeutender Verschiebung doch wieder vollkommen in ihre frühere Lage zurückkehren, und solche Körper, wie z. B. Federharz (gummi elasticum), Stahl, Elfenbein u. s. w., werden vorzugsweise elastisch genannt; andere hingegen, wie Blei, Glas u. s. w., sind nur in geringem Grade elastisch, sie können keine große Verschiebung der Theilchen ertragen, ohne daß der frühere Gleichgewichtszustand aufgehoben wird.

Die Verschiebung der Theilchen kann entweder durch Spannung, durch Zusammendrückung, durch Biegung oder durch Drehung bewirkt werden.

Wenn eine große Kraft nöthig ist, um überhaupt eine Verschiebung der Theilchen eines Körpers hervorzubringen, so nennt man ihn hart. Ein Körper kann hart und elastisch sein, wie dies beim Elfenbein, beim Stahl u. s. w. der Fall ist; das Glas dagegen ist hart und wenig elastisch.

Ein Körper, dessen Theilchen schon durch eine geringe Kraft verschoben werden können, wird weich genannt. Auch die weichen Körper können entweder sehr elastisch sein, wie z. B. Federharz, oder nur einen sehr geringen Grad von Elasticität besitzen, wie dies z. B. beim feuchten Thon der Fall ist. Der Aggregatzustand solcher weichen, mehr oder weniger breiartigen Körper kann gewissermaßen als ein Mittelzustand zwischen dem vollkommen festen und dem vollkommen flüssigen betrachtet werden.

Wenn die Theilchen eines Körpers über die Elasticitätsgränze hinaus verschoben werden, so hört entweder der Zusammenhang ganz auf, oder die Theilchen ordnen sich zu einem neuen stabilen Gleichgewichtszustande. Im ersteren Falle nennt man die Körper spröde, im letzteren dehnbar. Die äußere Gestalt spröder Körper läßt sich durch Druck, durch Stoß u. s. w. nicht bleibend ändern; wenn durch diese äußeren Ursachen die Theilchen spröder Körper über eine gewisse Gränze verschoben werden, so brechen sie; die Gestalt dehnbarer Körper hingegen läßt sich durch solche mechanische Mittel bleibend verändern, wie dies z. B. das Drahtziehen, das Prägen der Münzen beweist. Wird ein gehärteter Stahlstab über gewisse Gränzen hinaus gebogen, so bricht er, während ein Bleistab krumm bleibt.

Die Briefwage, Fig. 55 (a. f. S.), und die Federwage, Fig. 56 (a. f. S.), können als Beispiele der Anwendung der Elasticität dienen. Erstere bedarf wohl keiner Erläuterung; letztere wird durch einen Stahlstreifen *abcdf* gebildet, welcher ungefähr 2 mm dick und 10 bis 14 mm breit, bei *f* den Drehpunkt des Zeigerhebels *fh* trägt. Dieser Hebel liegt auf der unteren Kante eines in *ba* angebrachten Schlitzes auf. Das freie Ende des Hebels ist geschlitzt, so daß die eine Zinke auf die Vorderseite, die andere auf die Rückseite einer empirisch getheilten Scala zeigt. Kleinere Lasten werden am Haken *C* befestigt, während die ganze Vorrichtung am Ringe *A* aufgehängt wird. Durch das an *C* hängende Gewicht wird *f* niedergezogen, so daß das freie Ende *h* des Zeigerhebels in die Höhe gehen muß, und zwar um so mehr, je schwerer die angehängte Last ist, deren Größe man an der Scala ablesen kann. Für schwerere Lasten wird das Instrument am Ringe *B* auf- und die Last in den Haken *D*

eingehängt. Die Scala für schwerere Lasten befindet sich auf der Rückseite des Instrumentes.

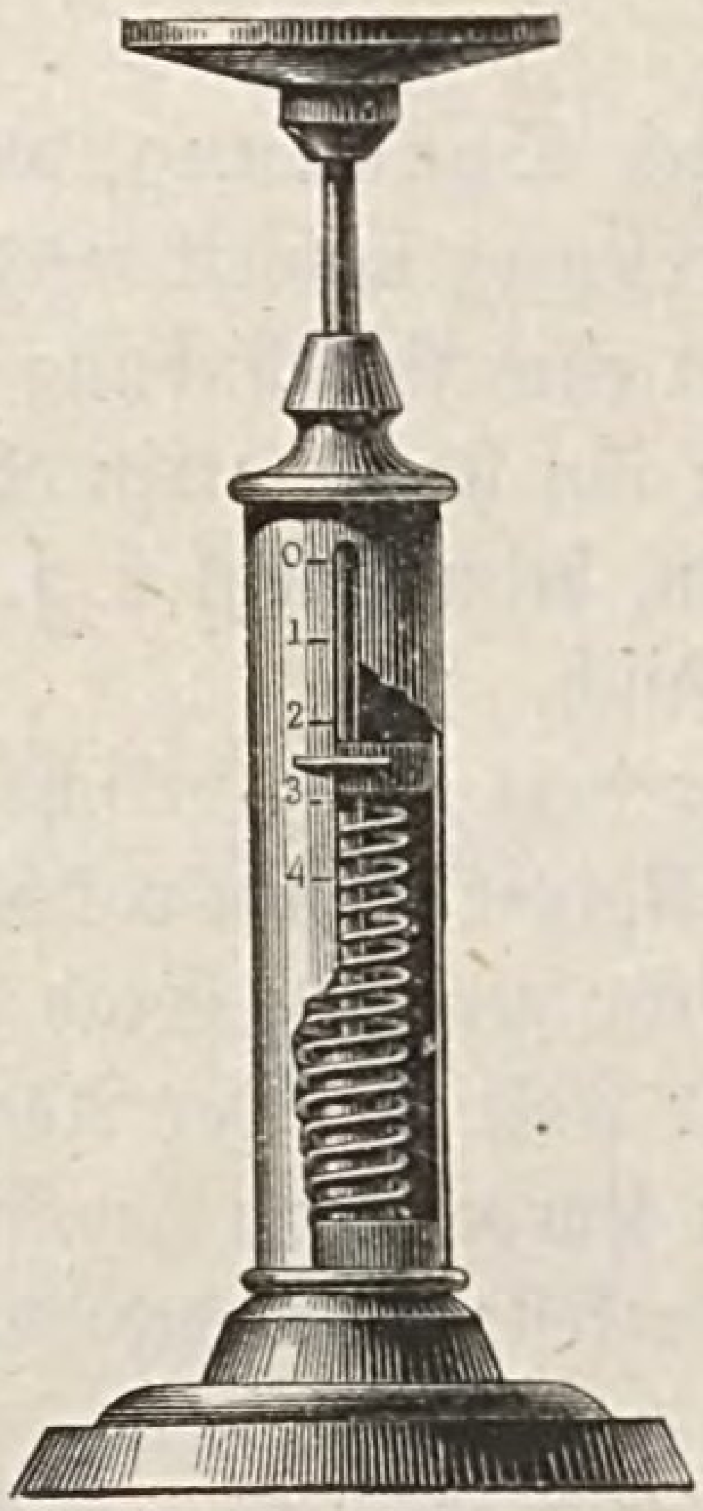


Fig. 55.

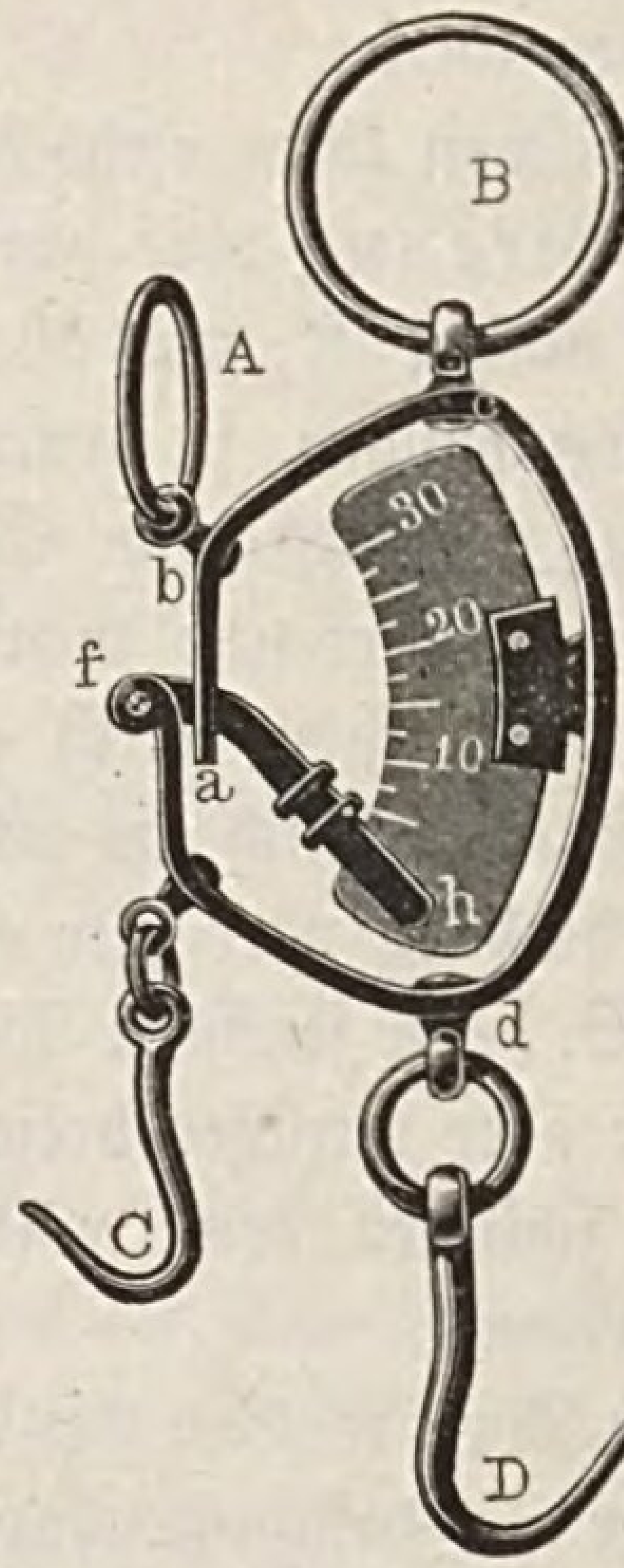
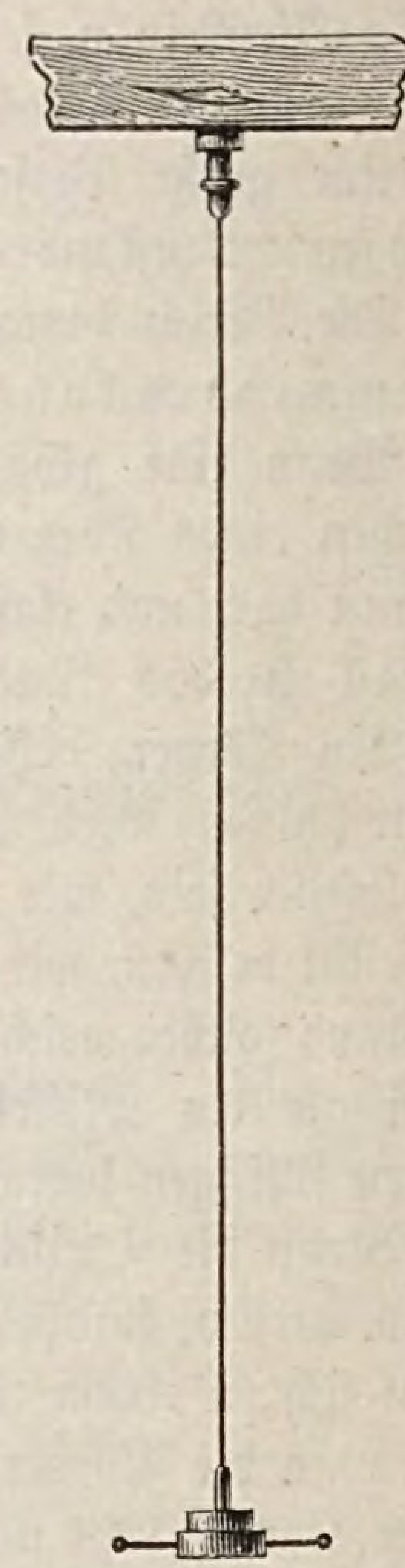


Fig. 56.


Fig. 57.

Diese Vorrichtung kann auch als Zugkraftmesser oder Dynamometer benutzt werden.

Wenn ein an seinem oberen Ende eingeklemmter Metalldraht durch angehängte Gewichte gestreckt wird, Fig. 57, so wird er sich bei einer bestimmten Lage dieses Gewichtes im Gleichgewichtszustande befinden. Dreht man das untere Ende des Drahtes (ohne denselben aus seiner verticalen Lage zu bringen) sammt dem angehängten Gewichte um eine beliebige Anzahl von Graden aus seiner Gleichgewichtslage heraus, so wird dadurch der Draht gewunden, er wird tordirt und die dadurch ins Spiel gesetzte Torsionselasticität äußert nun ein Streben, den Draht sammt dem angehängten Gewichte wieder in seine Gleichgewichtslage zurückzuführen. Sich selbst überlassen, kommt aber der Draht erst nach einer Reihe von Schwingungen in der Gleichgewichtslage zur Ruhe.

Die Kraft, mit welcher der tordirte Draht wieder in seine Gleichgewichtslage zurückzukehren strebt, ist der Größe der Drehung proportional.

31 **Festigkeit.** Die Kraft, mit welcher ein Körper der Trennung seiner Theilchen widersteht, nennt man seine Festigkeit.

Der zwischen den einzelnen Theilchen eines festen Körpers stattfindende Zusammenhang läßt sich durch Zerreißen, durch Zerbrechen, durch Zerwinden (Abdrehen) oder durch Zerdrücken aufheben.

Absolute Festigkeit nennt man die Kraft, mit welcher ein Körper dem Zerreißen widersteht, wenn er der Länge nach angespannt wird. Dieser Widerstand ist dem Querschnitte des zu zerreißenden Körpers proportional; denn es muß ja der Zusammenhang von zwei-, drei-, viermal so vielen Theilchen aufgehoben werden, wenn der Querschnitt eines Körpers zwei-, drei-, viermal so groß ist. Es ist also

$$P = nk,$$

wenn P die absolute Festigkeit, also die eben zum Zerreißen nöthige Kraft, n den Querschnitt des Körpers und k einen constanten Factor bezeichnet, welcher von der Natur der zu zerreißenden Substanz abhängig ist. Dieser Factor k giebt die Kraft an, welche eben nöthig ist, um einen Stab zu zerreißen, dessen Querschnitt gleich der Flächeneinheit ist, und wird der Festigkeitsmodulus genannt. Der Zahlenwerth von k hängt davon ab, welche Flächeneinheit und welche Gewichtseinheit man wählt.

Nach den Versuchen von P. v. Muschenbroek (1692 bis 1761) ist bei 1 qmm Querschnitt der Festigkeitsmodulus für

Lindenholz	9,18	kg
Kiefernholz (Pinus sylvestris)	10,21	„
Weißtanne (Pinus abies)	6,01 bis 9,29	„
Eichenholz	11,50 „ 14,66	„
Buchenholz	13,49 „ 15,86	„
Ebenholz	9,34	„
Kupferdraht	27,82	„
Messingdraht	35,50	„
Golddraht	46,45	„
Bleidraht	2,72	„
Zinndraht	4,57	„
Silberdraht	34,11	„
Eisendraht	41,82	„
Stahldraht	102,00	„
Glas, weißes	1,42 bis 2,33	„
Hanfseile	3,50 „ 6,20	„

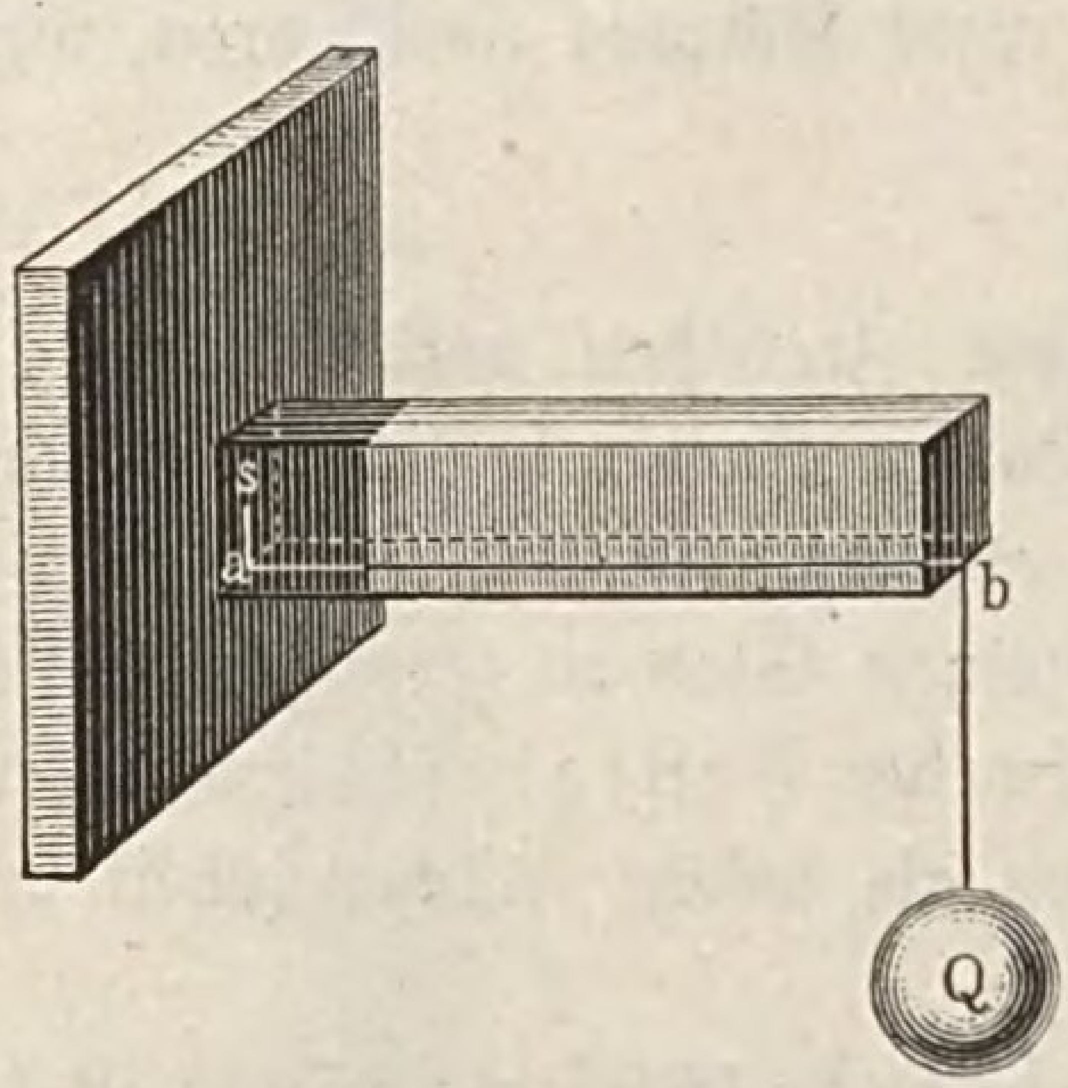
Die große Verschiedenheit in der Festigkeit der Hanfseile rührt von der ungleichen Beschaffenheit des Materials her, aus dem sie verfertigt sind. Dünne Seile sind verhältnißmäßig stärker als dicke, weil sie aus besserem Hanf gedreht sind; durch starkes Drehen der einzelnen Fäden wird die Tragkraft der Seile bedeutend vermindert. Nasse Seile haben eine geringere Festigkeit als trockene.

Bei praktischen Anwendungen wird man der Sicherheit wegen wohlthun, für Metalle höchstens $^1/_2$, für Hölzer nur $^1/_3$ der durch die Versuche ermittelten absoluten Festigkeit in Rechnung zu bringen.

Die Kraft, welche ein Körper dem Zerbrechen entgegensetzt, nennt man seine relative Festigkeit. Um einen Körper zu zerbrechen, ist die Kraft am besten rechtwinklig zu seiner Längenaxe anzubringen; der zu zerbrechende Körper ist entweder nur an einem, oder an zwei Enden unterstützt.

In Fig. 58 ist ein prismatischer Körper dargestellt, welcher mit dem einen Ende in einer festen Wand steckt, während am anderen Ende das Gewicht Q angebracht ist, welches ihn zerbrechen soll.

Fig. 58.



Bezeichnen wir die absolute Festigkeit, d. h. die Kraft, mit welcher der Körper einer in seiner Längenaxe wirkenden Kraft widersteht, die ihn zu zerreißen strebt, mit K, so können wir uns diese Kraft in dem Schwerpunkte s desjenigen Querschnitts vereinigt denken, welcher mit der Ebene der festen Wand zusammenfällt. Das Gewicht Q äußert nun ein Bestreben, den ganzen Körper um die untere Kante a dieses Querschnitts zu drehen, es wirkt also an dem Hebelarme ab, während der in s angebrachte Widerstand an dem Hebelarme as wirkt; wenn nun der Widerstand gerade der Kraft das Gleichgewicht halten soll, so muß sich der Widerstand K zur Kraft Q umgekehrt verhalten wie der Hebelarm as zum Hebelarm ab. Wenn die Höhe des Balkens mit h bezeichnet wird, so ist $as = \frac{1}{2}h$; bezeichnet man ferner die Länge ab mit l, so hat man:

$$K : Q = l : \tfrac{1}{2}h$$

oder

$$Q = \frac{K \cdot h}{2l}.$$

Die Größe der Festigkeit K, mit welcher der Körper dem Zerreißen widersteht, hängt aber von dem Querschnitte des Balkens ab. Bezeichnen wir mit k den Modulus der absoluten Festigkeit, mit h die Höhe, mit b die Breite des Balkens, so ist:

$$K = kbh,$$

also

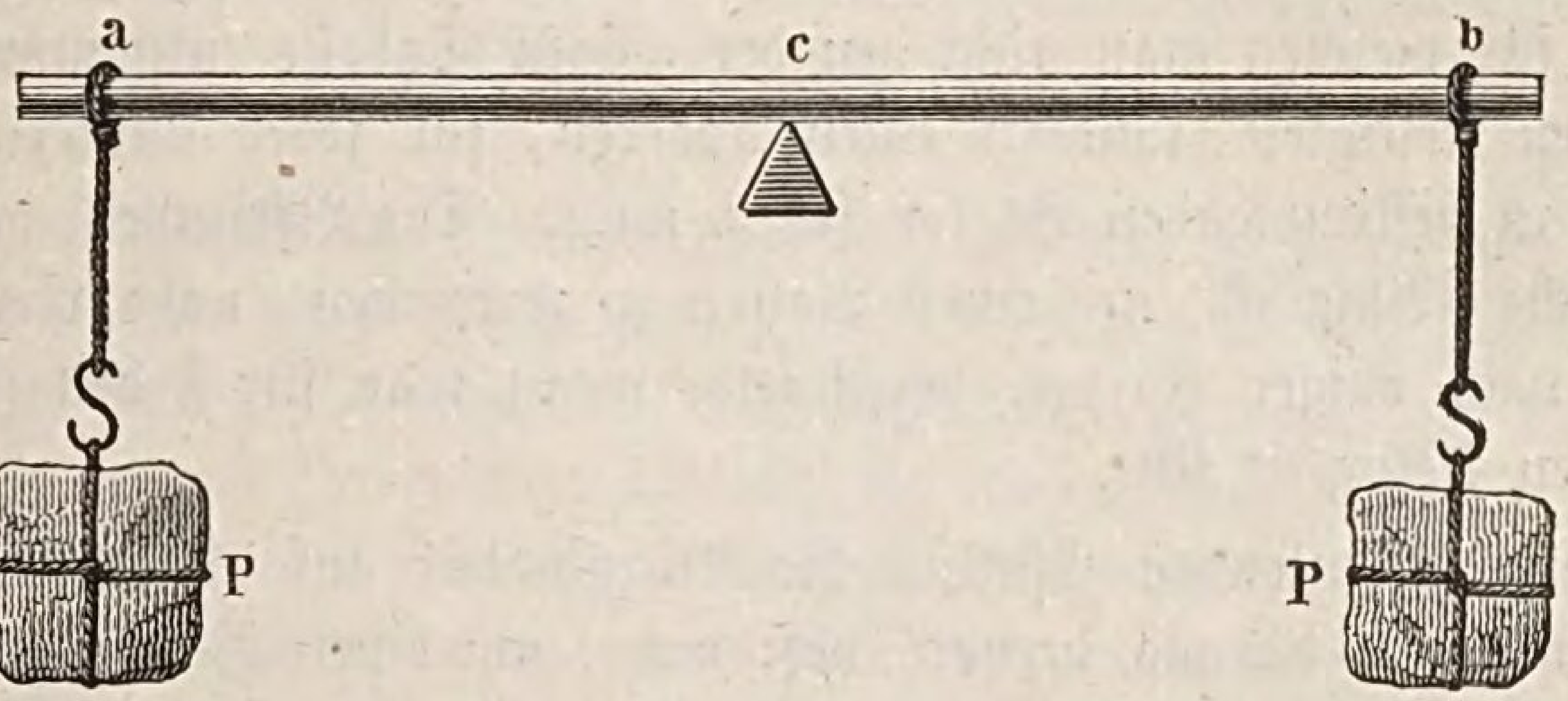
$$Q = \frac{kbh^2}{2l}.$$

Aus dieser Formel sieht man, daß die zum Abbrechen nöthige Kraft im geraden Verhältniß der Breite und des Quadrats der Höhe wächst, sich aber umgekehrt verhält wie die Länge.

Wenn ein Stab oder Balken in der Mitte seiner Länge durch eine scharfe Kante unterstützt und an seinen beiden Enden durch gleiche Gewichte P, Fig. 59, belastet ist, so werden diese ein Bestreben äußern, ihn in seiner Mitte zu zerbrechen, und zwar muß, um den Bruch wirklich herbeizuführen, das Gewicht

P, welches bei *a* und bei *b* wirkt, gerade so groß sein als das Gewicht *Q*, welches man bei *b* anbringen müßte, um den Stab bei *c* abzubrechen, wenn *cb* das frei aus einer Wand hervorragende Ende des Stabes wäre.

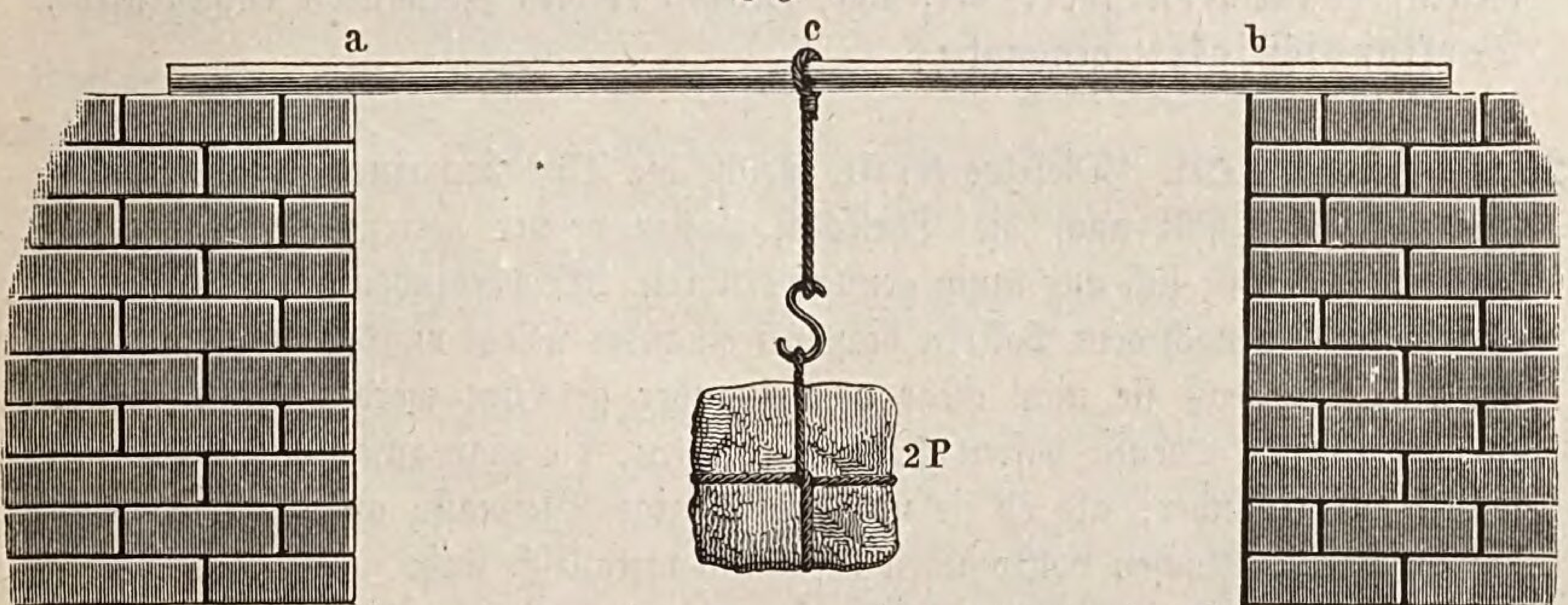
Fig. 59.



Der Druck, den die Unterlage in der Mitte bei *c* auszuhalten hat, ist offenbar 2 *P*.

Ist der Stab oder Balken an den beiden Enden unterstützt, wie Fig. 60, so kann man ihn dadurch zerbrechen, daß man eine Last 2 *P* in der Mitte anhängt.

Fig. 60.



Wir haben bei unseren bisherigen Betrachtungen und Rechnungen ganz unberücksichtigt gelassen, daß sich die Balken vor dem förmlichen Abbrechen erst biegen. Durch diese Biegung wird aber die relative Festigkeit bedeutend modificirt, so daß die nach obigen Formeln aus der bekannten absoluten Festigkeit berechneten Werthe der relativen Festigkeit von der Wirklichkeit bedeutend abweichen können. Wenn aber diese Formeln auch nicht dienen können, um die Größe der relativen Festigkeit zu berechnen, so dienen sie doch, um die relative Festigkeit von Balken und Stäben zu vergleichen, wenn sie aus demselben Material verfertigt und wenn nur ihre Dimensionen verschieden sind; denn wie auch durch die Biegsamkeit die Größe der absoluten Festigkeit modificirt werden mag, so ist sie doch stets der Breite und dem Quadrat der Höhe direct, der Länge aber umgekehrt proportional.

In der Formel

$$Q = k \frac{b h^2}{2 l}$$

wird also durch die Biegsamkeit nichts verändert als der Werth des constanten Factors k, für welchen man nicht den der obigen Tabelle entnommenen Werth der absoluten Festigkeit, sondern einen anderen, für jedes Material durch die Erfahrung zu bestimmenden Factor setzen muß. Die Versuche zeigen, daß die Kraft, welche nöthig ist, um einen Balken zu zerbrechen, nahe viermal kleiner ist als die nach obiger Formel berechnete, wenn man für k den Zahlenwerth der absoluten Festigkeit setzt.

Welchen bedeutenden Einfluß die Biegsamkeit auf die relative Festigkeit ausübt, geht auch daraus hervor, daß man, um einen Balken zu zerbrechen, der an seinen beiden Enden aufliegt, wie in Fig. 60, in der Mitte nur die Hälfte des Gewichtes anzuhängen braucht, welches zum Zerbrechen nöthig ist, wenn der Balken an beiden Enden festgeklemmt ist.

Bei Hölzern hat natürlich auch die Richtung der Fasern einen bedeutenden Einfluß auf die Festigkeit.

Der Widerstand, welchen ein Körper dem Zerdrücken entgegensetzt, wird rückwirkende Festigkeit, derjenige, welchen er dem Zerwinden entgegensetzt, Torsionsfestigkeit genannt.

32 **Adhäsion.** Dieselbe Kraft, welche die Theilchen eines festen Körpers zusammenhält, hält auch die Theilchen zweier vorher getrennter Körper zusammen, wenn sie sich nur innig genug berühren. So verbinden sich oft Spiegelplatten, welche nach dem Poliren dicht an einander gelegt worden sind, so innig mit einander, daß sie nicht mehr von einander getrennt werden können, ohne zu zerbrechen. Ebenso haften zwei Bleiplatten, die man zusammendrückt, fast so fest auf einander, als ob sie nur eine einzige Bleimasse ausmachten, wenn die Berührungsflächen vollkommen eben und metallisch sind.

Dieses Aneinanderhaften zweier Körper wird mit dem Namen Adhäsion bezeichnet.

Die Adhäsion zeigt sich nicht allein bei gleichartigen, sondern auch bei verschiedenartigen Körpern. Eine Bleiplatte mit einer Zinnplatte oder eine Kupferplatte mit einer Silberplatte durch Glättwalzen gezogen, geben ein fast untrennbares Ganzes.

Besonders stark zeigt sich die Adhäsion, wenn ein flüssiger Körper mit einem festen in Berührung gebracht, und dann der flüssige Körper durch Erkalten oder durch Verdunstung des Lösungsmittels fest wird; hierauf beruht das Löthen, das Leimen und das Kitten. Kittet man vermittelst Siegellacks zwei Glasstücke zusammen, so kommt es oft vor, daß beim Auseinanderreißen nicht das Glas sich vom Siegellack trennt, sondern daß Stücke aus dem Glase herausgerissen werden.

Wenn zwei Körper, die mit ebenen Flächen auf einander liegen, über einander fortgeschoben werden sollen, so setzt die Adhäsion dieser Bewegung ein Hinderniß entgegen; die Adhäsion hat also einigen Antheil am Reibungswiderstande, der überall da überwunden werden muß, wo zwei Körper über einander hingleiten oder wo sich ein Körper über einen anderen hinwälzt. Von der Reibung wird weiter unten noch die Rede sein.

Krystallisation. Wenn ein Körper aus dem flüssigen oder gasförmi- 33
gen Zustande in den festen Zustand übergeht, so werden die bis dahin leicht an einander verschiebbaren Theilchen in einer bestimmten gegenseitigen Lage festgehalten. In der ganzen Natur zeigt sich aber bei diesem Uebergange in den festen Zustand ein Bestreben der Theilchen, eine regelmäßige Anordnung hervorzubringen. In der unorganischen Natur bewirkt dieses Bestreben die Krystallisation.

Krystalle nennt man solche feste Körper, welche sich in regelmäßigen, durch ebene Flächen begränzten Gestalten gebildet haben. In der Natur findet man eine Menge solcher Krystalle; Quarz (Bergkrystall), Kalkspath, Schwerspath, Topas, Granat u. s. w. werden oft sehr schön krystallisirt gefunden.

Der Uebergang aus dem flüssigen in den festen Zustand findet entweder durch Erstarren eines geschmolzenen Körpers, oder durch Ausscheidung aus einer Auflösung Statt.

Wenn man geschmolzenes Wismuth in einer etwas erwärmten Schale erkalten läßt, so bildet sich nach einiger Zeit auf der Oberfläche eine feste Kruste. Wird diese Kruste durchstochen und das im Innern noch flüssige Metall abgegossen, so erscheint das Innere der so gebildeten Höhlung mit schönen würfelähnlichen Krystallen ausgekleidet.

Auf ähnliche Weise kann man auch Krystalle aus einer geschmolzenen Schwefelmasse erhalten.

Wenn man mit Aufmerksamkeit ein gefrierendes Wasser beobachtet, so sieht man, wie feine Eisnadeln sich bilden, die sich mit jedem Augenblicke ausbreiten und verzweigen. Freilich zeigen sich hierbei selten so regelmäßige krystallinische Gestalten, wie man sie beim Schnee beobachtet; doch sieht man deutlich, daß auch die Eisbildung eine Krystallbildung ist.

Viele Körper lösen sich in Flüssigkeiten, namentlich in Wasser auf, und zwar so, daß eine bestimmte Menge Flüssigkeit nicht über eine bestimmte Menge eines anderen Stoffes auflöst; diese Menge richtet sich aber nicht allein nach der Natur der Flüssigkeit und des Stoffes, sondern auch nach deren Temperatur. So besitzt warmes Wasser in der Regel ein größeres Auflösungsvermögen als kaltes. Wenn daher eine Auflösung bei hoher Temperatur gesättigt wurde, d. h. wenn sie die größtmögliche Menge des festen Stoffes im aufgelösten Zustande aufnahm, und man die Lösung erkalten läßt, so kann nicht mehr die ganze Menge des gelösten Körpers aufgelöst bleiben, sondern es muß sich ein Theil desselben im festen Zustande ausscheiden, wobei derselbe gewöhnlich Krystallform annimmt. Diese Erscheinung läßt sich beobachten an heißgesättigten Lösungen von Salzen, z. B. von Salpeter, Soda, Alaun, Kupfervitriol.

Auch durch das Verdunsten des Lösungsmittels können sich Krystalle bilden. Auf diese Art entstehen die bekannten treppenförmigen Kochsalzkrystalle, welche in den Salinen durch Abdampfen der Soole gewonnen werden.

Nicht allein aus wässerigen Lösungen scheiden sich Krystalle aus; der Schwefel z. B. löst sich in Schwefelkohlenstoff, in Chlorschwefel, in Terpentinöl auf, und aus diesen Lösungen kann man schöne durchsichtige Krystalle von Schwefel erhalten.

Manche Körper, welche durch Wärme in den dampfförmigen Zustand übergeführt werden, gehen bei der Abkühlung aus diesem Zustande unmittelbar in den festen über und scheiden sich dabei in Krystallen ab. Auf diesem Wege bilden sich aus dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf der Schnee, der Reif und die Eisblumen an den Fenstern.

Die Krystalle werden um so größer und regelmäßiger, je langsamer die Erkaltung oder die Verdunstung vor sich geht. Bei schneller Krystallisation bilden sich kleine Krystalle, die sich zu unregelmäßigen Gruppen zusammenhäufen, an denen man oft kaum ein krystallinisches Gefüge erkennen kann.

Jedem Stoffe kommt eine eigenthümliche Krystallform zu; so ist z. B. die Krystallform des Bergkrystalls eine andere als die des Alauns, und diese wieder eine andere als die des Kupfervitriols.

Die Untersuchung der Symmetriegesetze, welche zwischen den einzelnen Krystallflächen stattfinden, sowie die Beschreibung der Krystallformen überhaupt ist ein Gegenstand, mit welchem sich die Krystallographie zu beschäftigen hat. Die Grundzüge derselben werden in den entsprechenden Paragraphen des Supplementbandes besprochen.

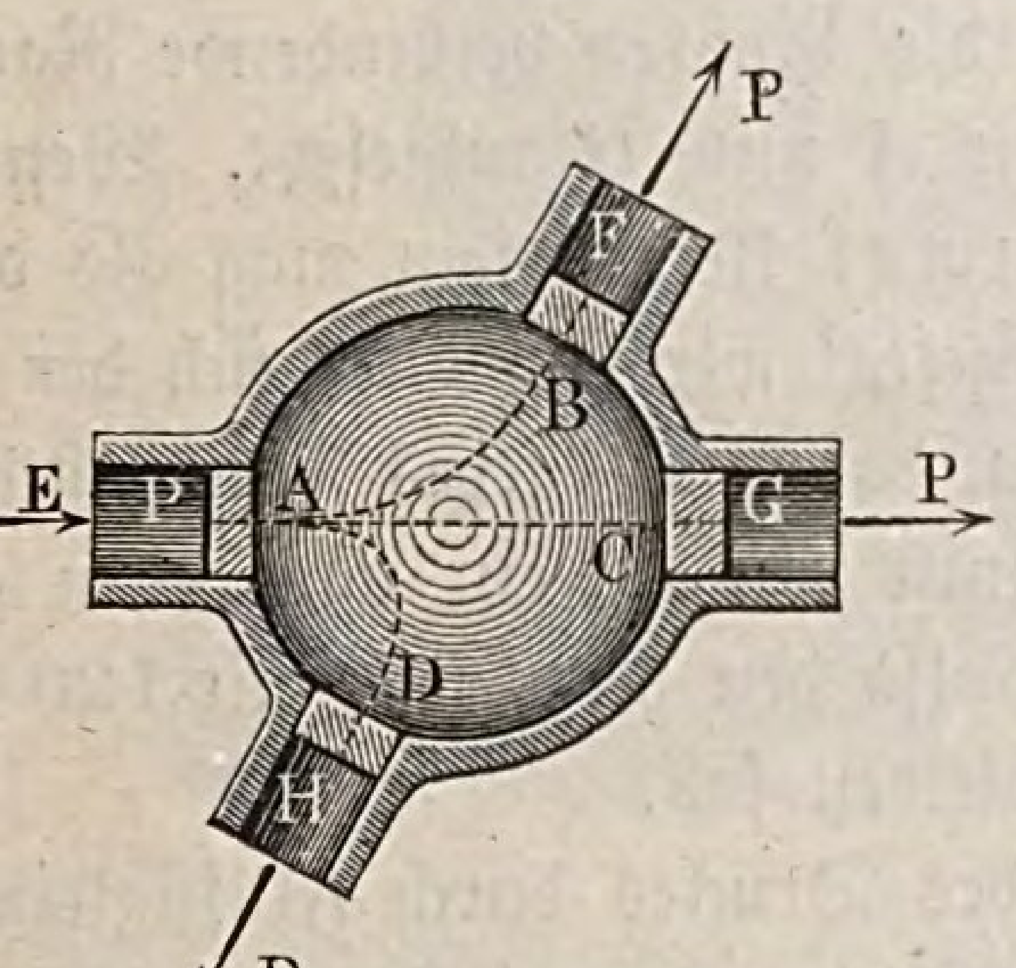
Drittes Capitel.

Hydrostatik oder die Lehre vom Gleichgewichte der Flüssigkeiten.

Princip der Gleichheit des Drucks. Flüssigkeiten 34
haben in Folge der leichten Verschiebbarkeit der Theilchen die Eigenschaft, daß sie jeden Druck, welcher auf einen Theil ihrer Oberfläche ausgeübt wird, nach allen Seiten gleichmäßig fortpflanzen.

Es sei in Fig. 61 der horizontale Durchschnitt eines ganz mit Wasser gefüllten und vollkommen verschlossenen Gefäßes dargestellt, an welchem sich in gleicher Höhe vier vollkommen gleiche Röhren befinden, die durch leicht bewegliche Kolben dicht verschlossen sind. Da diese Kolben gleichen Durchmesser haben und in ganz gleicher Höhe liegen, so haben sie durch die Schwere des Wassers auch vollkommen gleichen Druck auszuhalten, den wir jedoch hier nicht näher betrachten wollen.

Fig. 61.



Wird nun durch irgend eine Kraft einer der Kolben, etwa A, nach innen gedrückt, so pflanzt sich dieser Druck durch das Wasser hindurch auf die übrigen Kolben fort, und man müßte, um zu verhindern, daß diese Kolben herausgedrückt werden, auf jeden derselben einen nach innen gerichteten Gegendruck anbringen, welcher dem auf den Kolben A wirkenden Drucke vollkommen gleich ist; das Gleichgewicht kann also nur dann bestehen, wenn alle vier Kolben gleich stark nach innen gedrückt werden.

Der Druck pflanzt sich jedoch nicht allein vom Kolben *A* auf die übrigen Kolben, sondern auf alle Theile der Gefäßwand fort, so daß jeder Flächentheil der Gefäßwand, welcher eben so groß ist, wie der Querschnitt des Kolbens, auch einen eben so großen Druck auszuhalten hat.

In Fig. 62 ist der Querschnitt eines anderen Gefäßes mit zwei Röhren dargestellt, welche gleichfalls mit Kolben geschlossen sein mögen; die Röhren und folglich auch der Querschnitt der Kolben sind aber nicht gleich. Es sei z. B. die Oberfläche des Kolbens *C* viermal so groß als die des Kolbens *A*, so wird, wenn irgend eine Kraft gegen den Kolben *A* drückt, der Gesammtdruck auf den Kolben *C* auch viermal so groß sein als der auf *A* wirkende.

Fig. 62.

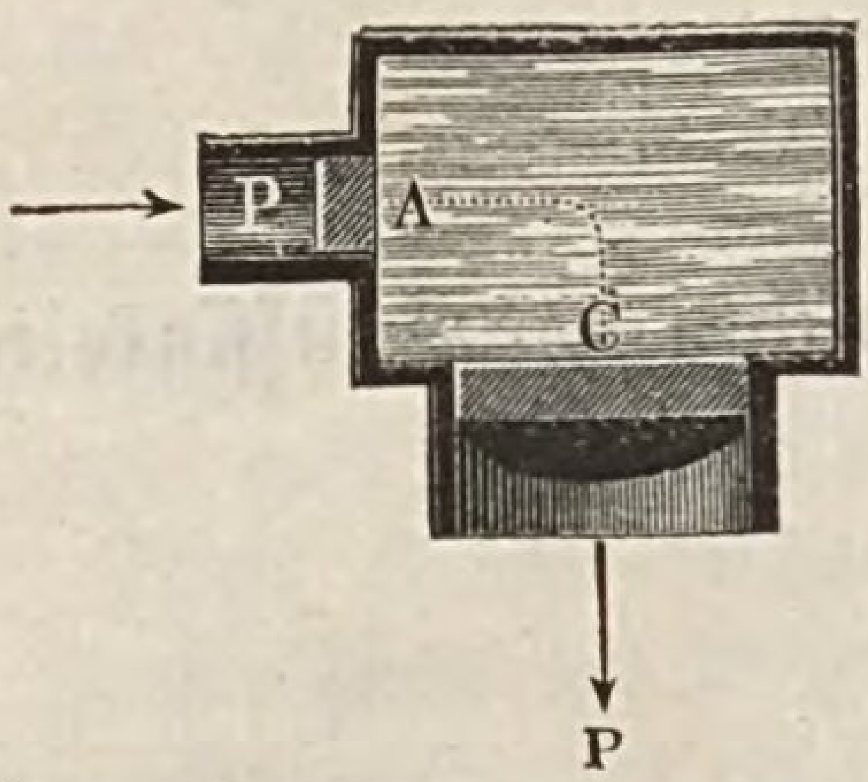
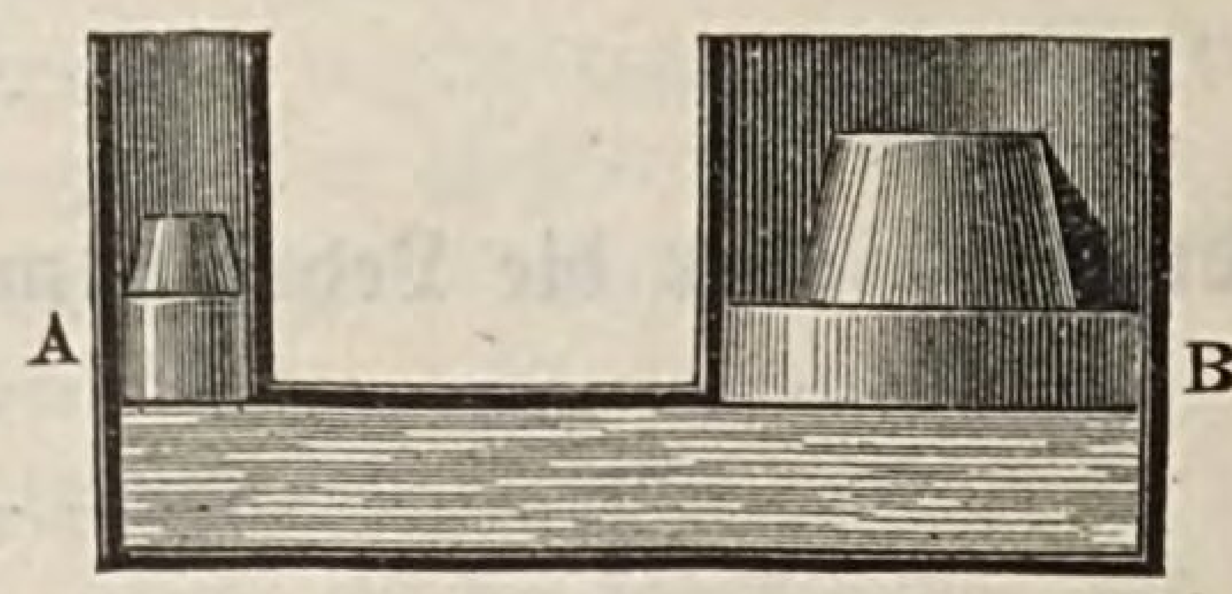


Fig. 63.



Wenn man also den Kolben *A* mit einer Kraft von 10 Pfund nach innen drückt, so muß man zur Erhaltung des Gleichgewichts an dem Kolben *C* einen nach innen gerichteten Druck von 40 Pfund anbringen.

Der Druck pflanzt sich nicht allein in einer Horizontalebene fort, wie dies in den bisher betrachteten Beispielen der Fall war, sondern auch nach oben und nach unten.

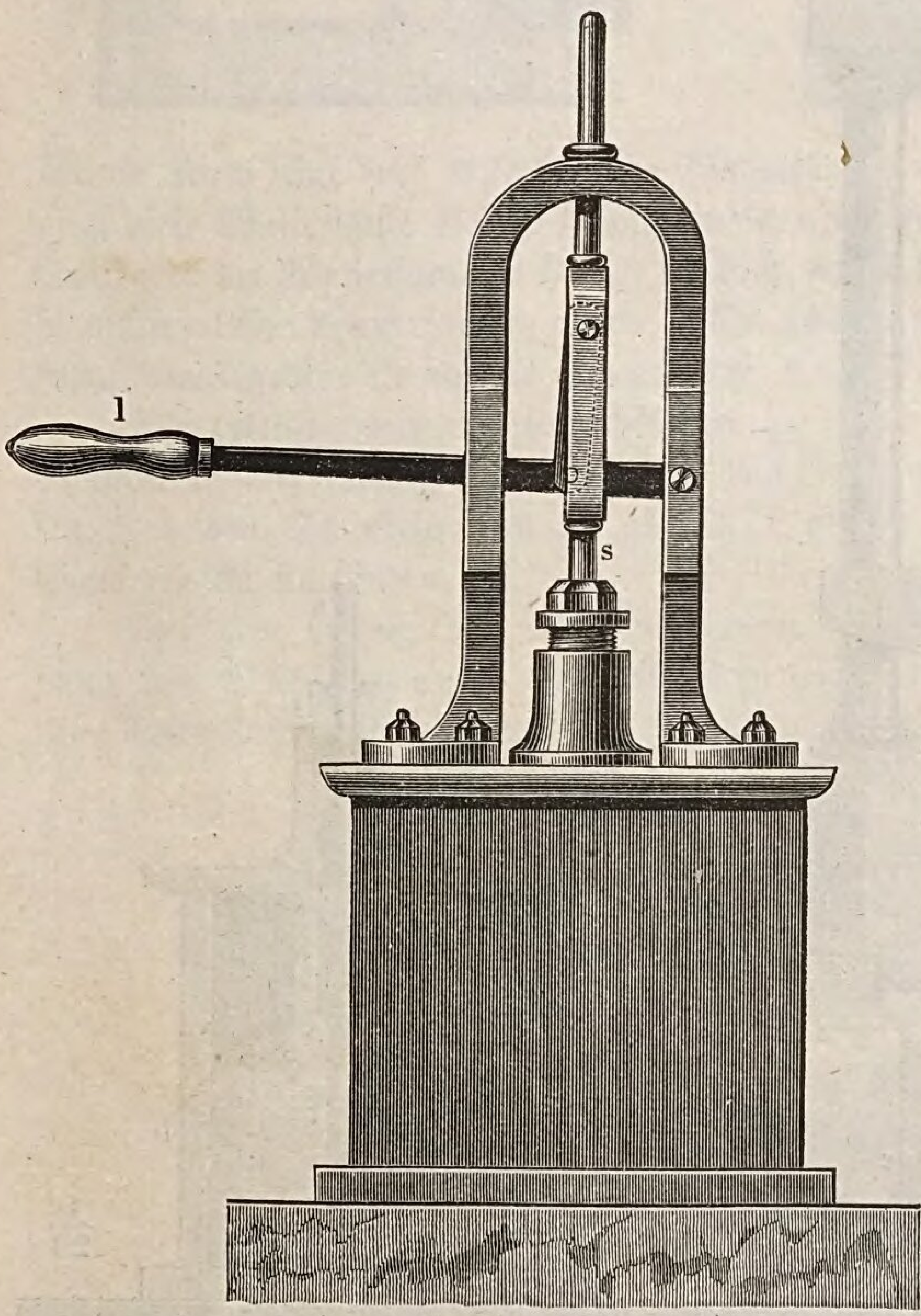
Fig. 63 stelle den verticalen Durchschnitt zweier unten verbundener Röhren von ungleichem Querschnitt dar. Der die Röhren verbindende Raum sei mit Wasser gefüllt und auf dieses die Kolben *A* und *B* aufgesetzt. Wenn nun auf den Kolben *A*, dessen Querschnitt zehnmal kleiner sein mag als der des Kolbens *B*, ein Gewicht von 12 Pfund aufgelegt wird, so wird sich der Druck in der Weise bis zum Kolben *B* fortpflanzen, daß gegen jedes Flächenstück von *B*, welches eben so groß ist als der Querschnitt von *A*, ein nach oben gerichteter Druck von 12 Pfund wirkt; man muß also den Kolben *B* mit 120 Pfund belasten, wenn das Gleichgewicht ungestört bleiben soll.

Auf der gleichförmigen Fortpflanzung des Druckes durch Flüssigkeiten beruht die hydraulische Presse. Dieselbe besteht aus zwei Haupttheilen, einer Saug- und Druckpumpe *bb*, Fig. 65 (a. S. 70), welche den Druck ausübt, und dem Preßcylinder *cc*, in dessen Höhlung der Kolben *pp*, von einem wasserdicht schließenden Lederringe umfaßt, von oben hineinragt. Fig. 64 ist eine äußere Ansicht der Druckpumpe von der rechten Seite der Fig. 65 aus gesehen. Durch den Hebel *l* wird der Kolben *s* gehoben, das Wasser des Behälters *b* dringt durch das Sieb *r*, hebt das Ventil *i* und gelangt so unter den Kolben *s*. Wenn man den Hebel *l* niederdrückt, so geht auch der Kolben *s* nieder, das

zurückgetriebene Wasser schließt das Ventil i, hebt das Ventil d und gelangt durch die Röhre t in den Cylinder c der Presse. Hier drückt es nun, vorausgesetzt, daß t und die Höhlung von c bereits vollständig mit Wasser gefüllt sind, gegen den Kolben p, den es mit der Platte n hebt, und so wird der zu pressende Körper zwischen n und der festen Platte e zusammengedrückt.

Wenn der Kolben s durch eine Kraft k niedergedrückt wird, so hat jeder Flächentheil der Gefäßwände, welcher dem Querschnitt des Kolbens s gleich ist, einen gleichen Druck auszuhalten. Ist also der Querschnitt des Kolbens p n mal so groß als der des Kolbens s, so wird der Kolben p mit einer Kraft nk gehoben.

Fig. 64.



Bezeichnen wir mit K den Druck, mit welchem der große Kolben gehoben wird, mit r den Halbmesser des Pumpenkolbens s, mit R den des Preßkolbens, so ist der Querschnitt des ersteren πr^2, der des letzteren πR^2, folglich

$$n = \frac{\pi R^2}{\pi r^2} = \frac{R^2}{r^2},$$

daher ist auch

$$K = k \cdot \frac{R^2}{r^2}.$$

Ist nun ferner l der Hebelarm, an welchen der Pumpenkolben angehängt ist, L der Hebelarm, an welchem der Arbeiter drückt, so ist:

$$k = D\,\frac{L}{l},$$

wenn D den Druck bezeichnet, welchen der Arbeiter ausübt; mithin haben wir

$$K = D\,\frac{L\,.\,R^2}{l\,.\,r^2}.$$

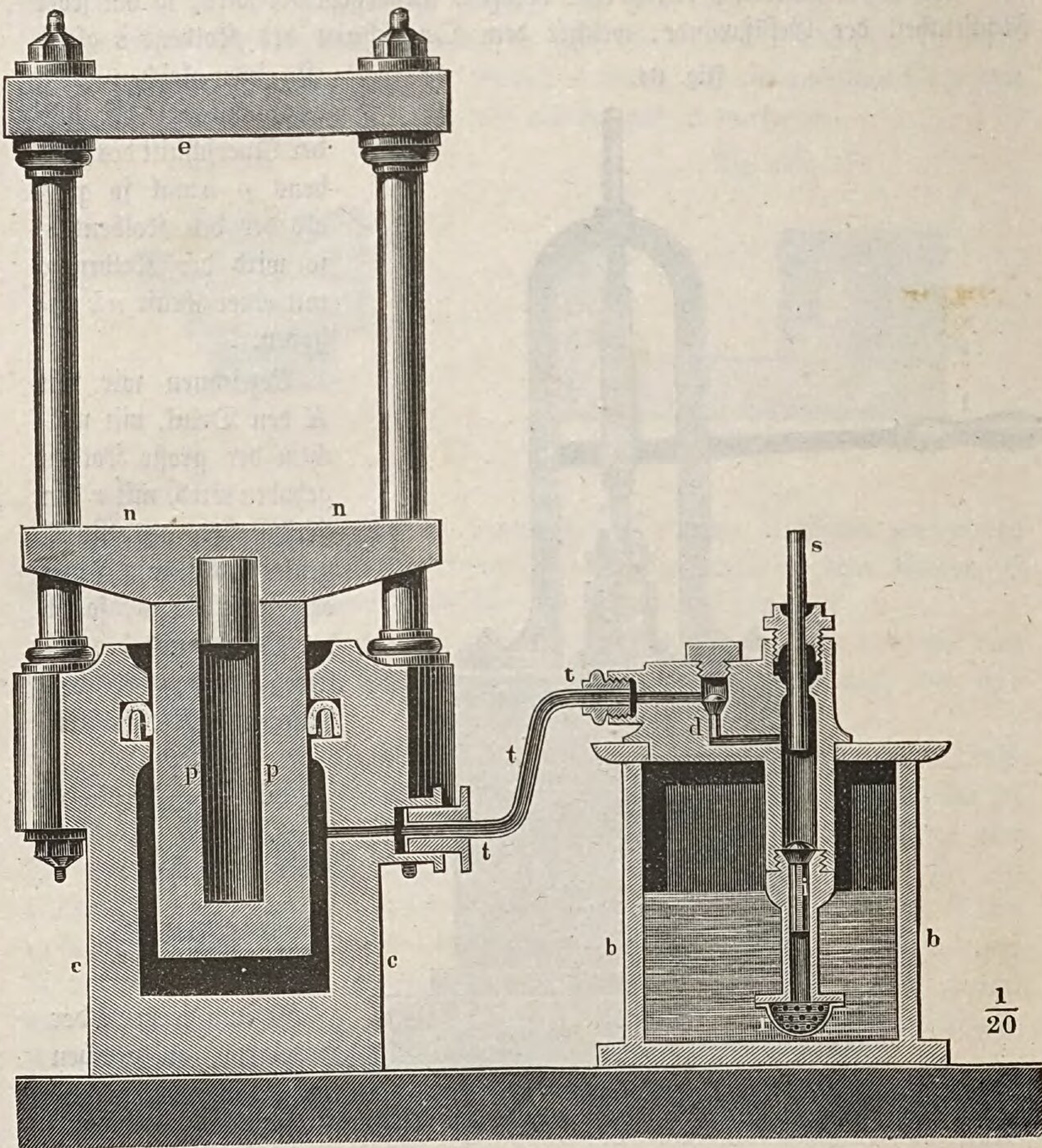
Ist z. B. $R = 10\,r$ und $L = 6\,l$, so ist:

$$K = D\,.\,600.$$

Wenn also der Hebel bei l mit einer Kraft von 25 Pfund niedergedrückt wird, so wird der Kolben p mit einer Kraft von 15 000 Pfund gehoben.

Von der Kraft, welche am Hebel l angewandt wird, geht ein Theil durch Reibungswiderstände verloren, bevor sie sich bis zum Kolben p fortpflanzt; des-

Fig. 65.



halb wird der Effect stets geringer sein, als er nach den eben angestellten Betrachtungen sein sollte.

35 **Communicirende Gefässe.** Denken wir uns in der Fig. 66 die Dicke der Kolben A und B auf Null reducirt, oder denken wir uns statt der Kolben nur Wasserschichten, so werden die Gleichgewichtsbedingungen unverändert dieselben bleiben. Wenn auf die Schicht $A\,C$, Fig. 67, irgend ein

gleichförmiger Druck ausgeübt wird, so findet das Gleichgewicht nur dann Statt, wenn auf die n mal größere Schicht BD auch ein n mal größerer Druck wirkt. Wird auf die Wasserschicht AC eine Wassersäule $ACFG$ aufgeschüttet, so ist es das Gewicht derselben, welches auf AC drückt. Will man diesem

Fig. 66.

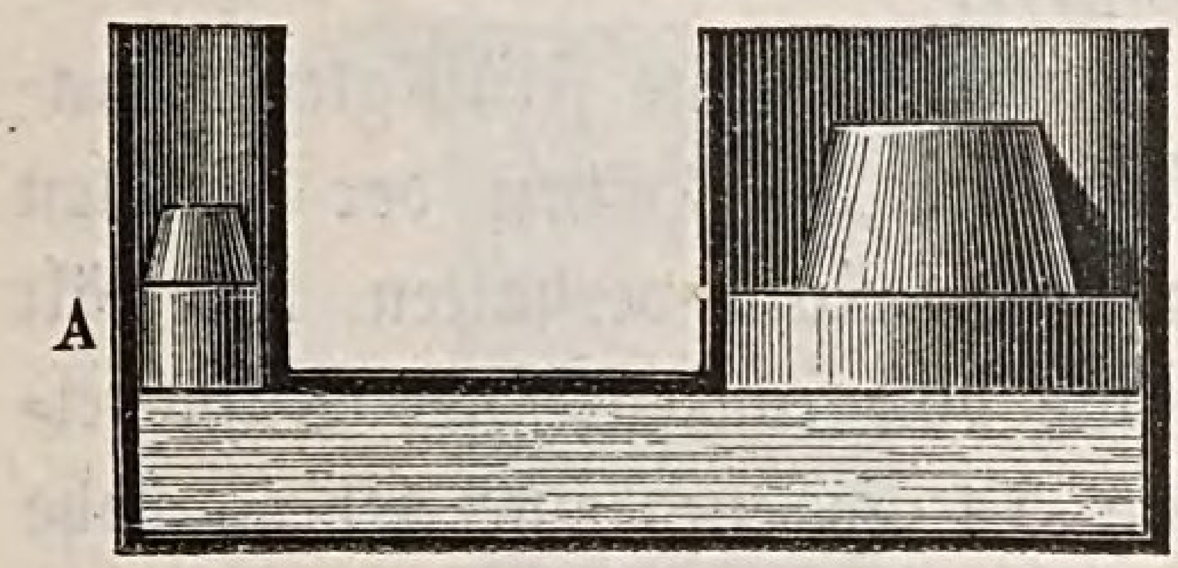
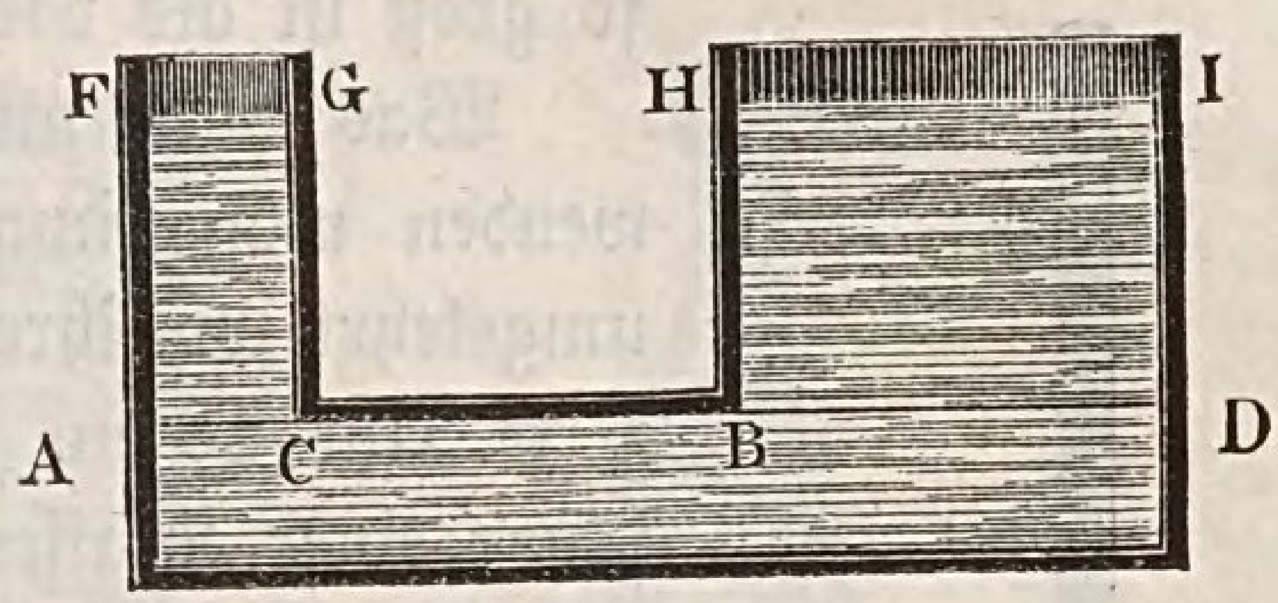


Fig. 67.

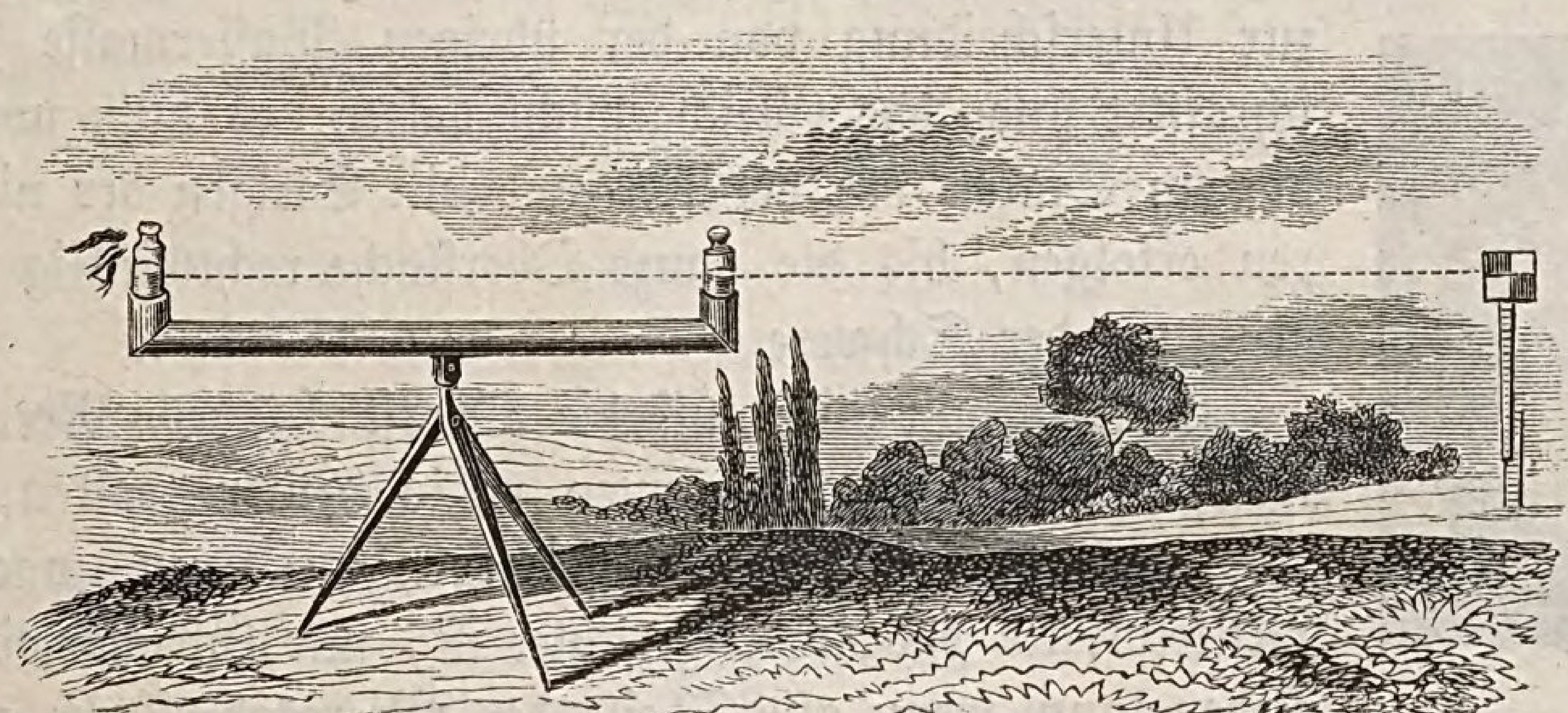


Drucke durch eine auf BD lastende Wassersäule das Gleichgewicht halten, so muß diese Wassersäule $BDHI$ nothwendig n mal so schwer sein als $ACFG$. Soll aber die Wassersäule $BDHI$ wirklich n mal schwerer sein als $ACFG$, so müssen beide Wassersäulen gleiche Höhe haben, da ja die Grundfläche BD schon n mal größer ist als die Grundfläche AC.

Für beliebig weite, verticale Röhren, die unten auf irgend eine Weise mit einander in Verbindung stehen, gilt also das Gesetz, daß sie bei gleicher Flüssigkeit in beiden Schenkeln bis zu gleicher Höhe gefüllt sein müssen, wenn Gleichgewicht stattfinden soll.

Auf dem Gesetze der communicirenden Röhren beruht auch die Anwendung der Wasserwagen zum Abvisiren horizontaler Linien. Die Einrichtung dieser Instrumente ist wohl aus Fig. 68 ohne weitere Erklärung verständlich.

Fig. 68.



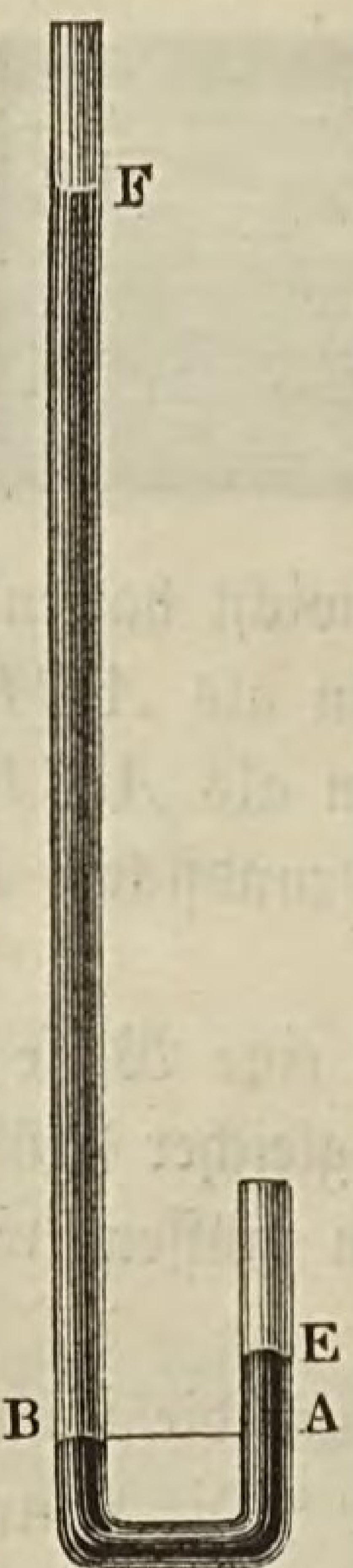
Nur bei ganz engen Röhren findet eine Abweichung von dem eben ausgesprochenen Gesetze Statt, welche später besprochen werden wird.

Sind Flüssigkeiten von ungleichem specifischen Gewichte in die beiden Schenkel gegossen, so sind natürlich die Flüssigkeitssäulen, welche sich das Gleichgewicht halten, nicht mehr gleich hoch, sondern ihre Höhen, von der Trennungsfläche an gerechnet, verhalten sich umgekehrt wie ihre specifischen Gewichte.

In die heberförmig gebogene Röhre Fig. 69 (a. f. S.) sei z. B. Quecksilber und dann in den längeren Schenkel Wasser gegossen. Denken wir uns

durch die Trennungsfläche von Quecksilber und Wasser eine horizontale Ebene *BA* gelegt, so wird alles Quecksilber unter *BA* für sich im Gleichgewicht sein, die Höhe der Quecksilbersäule *EA* ist aber für den Fall des Gleichgewichts beinahe 14 mal geringer als die Höhe der Wassersäule *BF* im anderen Schenkel, weil das specifische Gewicht des Quecksilbers nahe 14 mal so groß ist als das des Wassers.

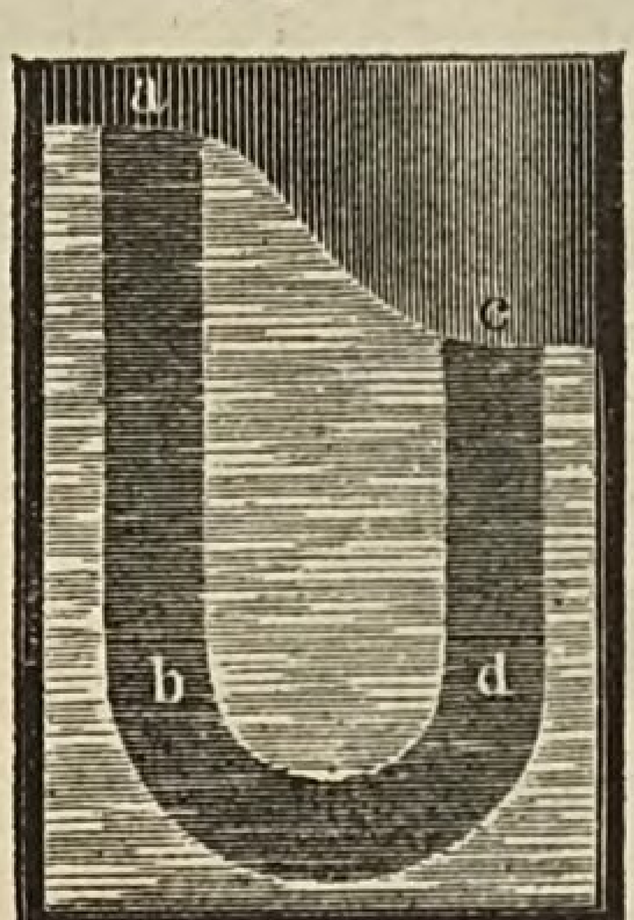
Fig. 69.



Was man nun auch für verschiedene Flüssigkeiten anwenden mag, immer müssen sich die Höhen der Säulen umgekehrt wie ihre specifischen Gewichte verhalten. So hält z. B. eine 40 cm hohe Säule von concentrirter Schwefelsäure einer Wassersäule von 74 cm und eine 40 cm hohe Säule von Schwefeläther einer Wassersäule von 28,5 cm das Gleichgewicht.

36 **Freie Oberfläche der Flüssigkeiten.** Aus dem zu Anfang des vorigen Paragraphen bewiesenen Satze geht nun auch hervor, daß der Spiegel, d. i. die freie Oberfläche einer jeden Flüssigkeit, auf welche nur die Schwere wirkt, nothwendig horizontal sein muß. Wir können uns die ganze Flüssigkeitsmasse in eine beliebige Menge verticaler Säulchen zerlegt denken, und diese müssen sich unter einander nach dem Principe der communicirenden Röhren das Gleichgewicht halten. Hätte z. B. die Oberfläche der Flüssigkeit die Gestalt der Fig. 70, so könnten sich unmöglich die Wassersäulen *cd* und *ab*, welche zur Unterscheidung von der übrigen Wassermasse stärker schraffirt sind, das Gleichgewicht halten; es muß nothwendig ein Sinken der höheren und ein Steigen der niedrigeren erfolgen, bis die ganze Oberfläche rechtwinklig ist zur Richtung der Schwere.

Fig. 70.



Wenden wir dies auf die Oberfläche des Meeres an, welches wir uns vollkommen ruhig denken wollen, so ist klar, daß, da die Schwerkraft allein wirkt und nach dem Mittelpunkte der Erde gerichtet ist, nur Gleichgewicht bestehen kann, wenn alle Theile der Meeresoberfläche auf den zugehörigen Erdradien senkrecht stehen. Dies ist aber nur dann möglich, wenn die Meeresoberfläche einen Theil einer Kugelfläche bildet.

37 **Bodendruck der Flüssigkeiten.** Wenn Flüssigkeiten im Gleichgewicht sind, so üben sie in Folge ihrer Schwere einen mehr oder minder bedeutenden Druck auf den Boden und die Seitenwände der Gefäße aus, in denen sie enthalten sind. Zunächst wollen wir den Druck untersuchen, welcher auf die horizontale Bodenfläche, alsdann denjenigen, welcher auf die Seitenflächen ausgeübt wird.

In Gefäßen, die, wie in Figur 71, 72 und 73, gleiche Grundflächen haben und bis zu gleicher Höhe mit Flüssigkeit gefüllt sind, hat der Boden gleichen Druck auszuhalten, mag nun das Gefäß oben weit oder eng, gerade oder ausgeschweift sein.

Fig. 71.

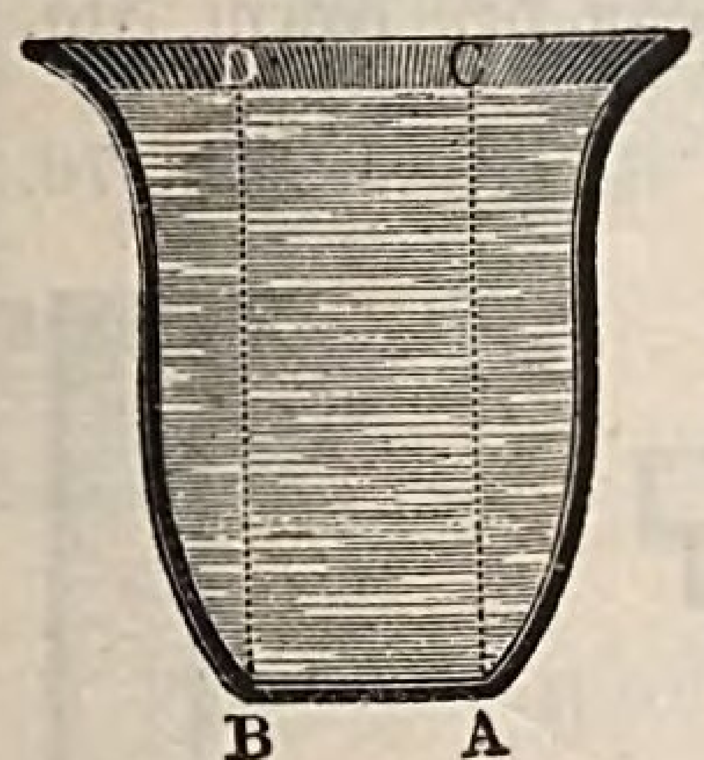


Fig. 72.

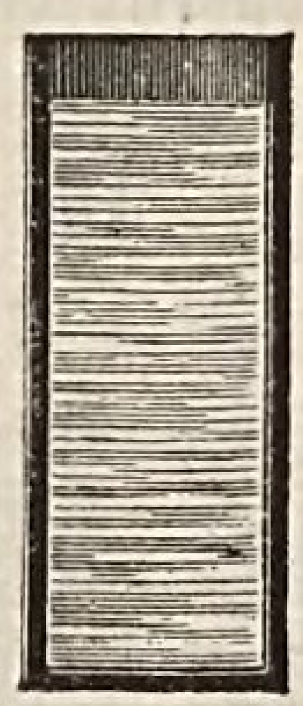


Fig. 73.



Der Druck, welchen der Boden eines mit einer Flüssigkeit gefüllten Gefäßes auszuhalten hat, ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, welche die gedrückte Fläche zur Grundfläche und ihren verticalen Abstand vom Flüssigkeitsspiegel zur Höhe hat.

Der Druck, welchen die Boden der Gefäße Figur 71, 72 und 73 auszuhalten haben, ist also gleich dem Gewichte der im Gefäß Fig. 72 enthaltenen Flüssigkeitssäule.

Wenn man allgemein mit s den Flächeninhalt des Bodens, mit h die Höhe des Flüssigkeitsspiegels über demselben und mit d das Gewicht der Raumeinheit Flüssigkeit bezeichnet, so haben wir für den Druck P, welchen der Boden auszuhalten hat, die Gleichung

$$P = s \cdot h \cdot d \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Für ein Maaßsystem, bei welchem, wie bei dem neufranzösischen, das Gewicht der Raumeinheit Wasser zur Gewichtseinheit genommen ist, ist das Gewicht der Raumeinheit auch gleich dem specifischen Gewichte (§. 9); man erhält somit den Bodendruck in Kilogrammen ausgedrückt, wenn s in Quadratdecimetern, h in Decimetern gemessen ist, und das Product dieser beiden Größen mit dem specifischen Gewichte multiplicirt wird.

Daß der Druck auf den Boden eines geraden cylindrischen Gefäßes, wie Fig. 72, gleich dem Gewicht der darin enthaltenen Flüssigkeit ist, bedarf keines Beweises; daß aber der Druck auf den Boden der oben erweiterten, verengten und ausgeschweiften Gefäße derselbe ist, soll nun noch bewiesen werden.

Fig. 74 (a. f. S.) stellt ein Gefäß vor, welches sich in treppenförmigen Absätzen nach oben erweitert. Hier ist nun klar, daß das Bodenstück pq nur die Last der Flüssigkeitssäule $pqem$ zu tragen hat, während das Gewicht der Flüssigkeitsmassen, welche die genannte Flüssigkeitssäule umgeben, durch den Boden der treppenförmigen Absätze getragen wird. Das Gleiche gilt auch für das Gefäß Fig. 75, dessen Absätze nur kleiner sind als die des zuerst betrach-

teten Gefäßes. Der Boden *pq* hat wieder nur das Gewicht der Flüssigkeitssäule *pqem* zu tragen.

Die Größe der Absätze hat auf die Richtigkeit dieser Betrachtung keinen Einfluß; unsere Schlüsse gelten also auch noch, wenn die einzelnen treppenförmigen Absätze verschwindend klein werden, sie gelten also auch noch für ein oben ausgeschweiftes Gefäß, etwa für ein solches von der Form Fig. 71.

Fig. 74.

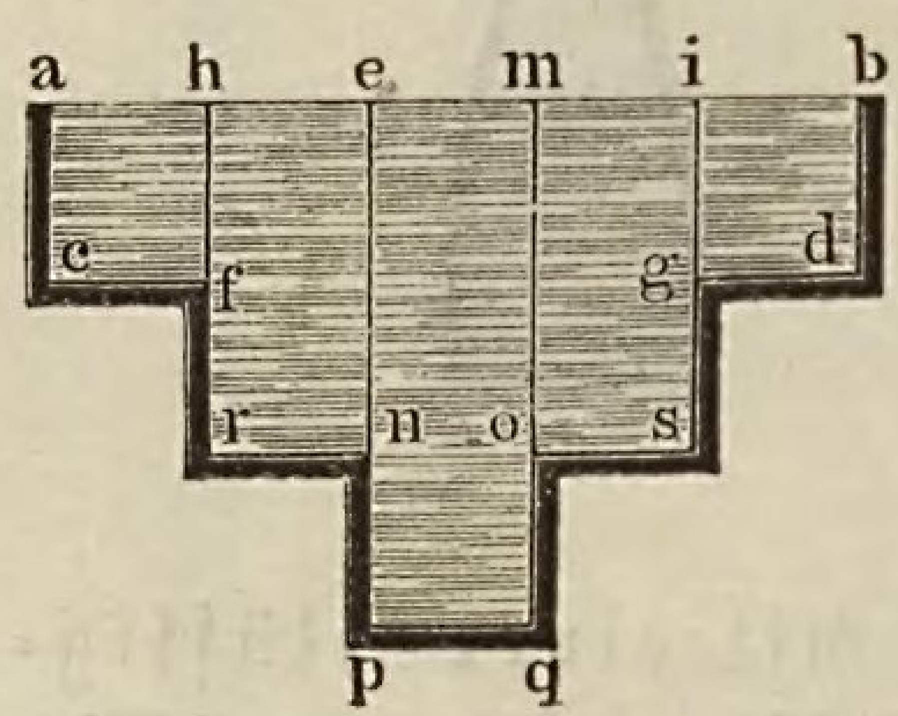


Fig. 75.

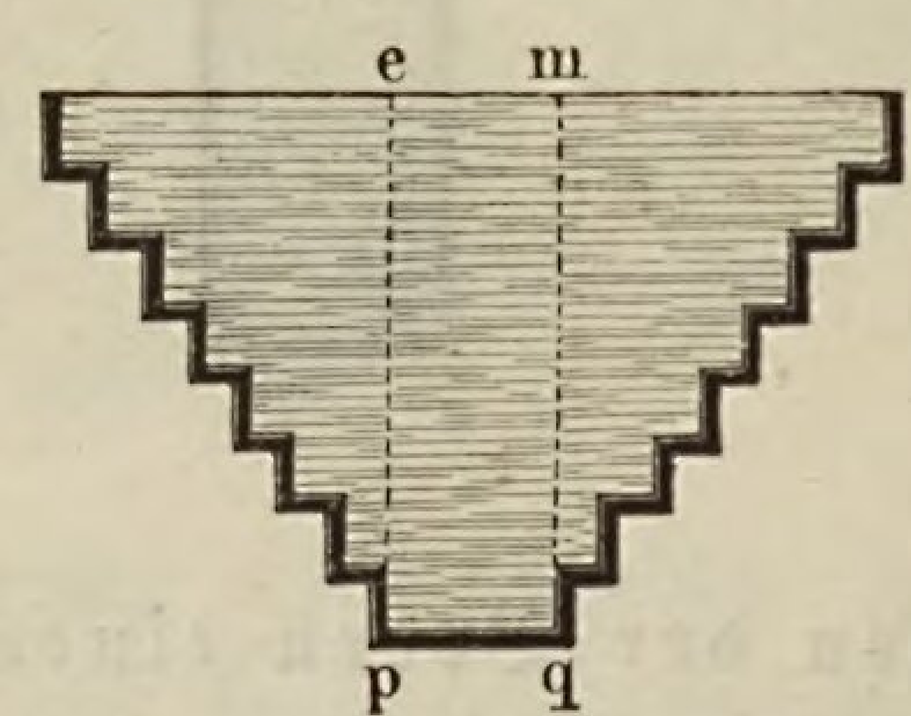


Fig. 76.

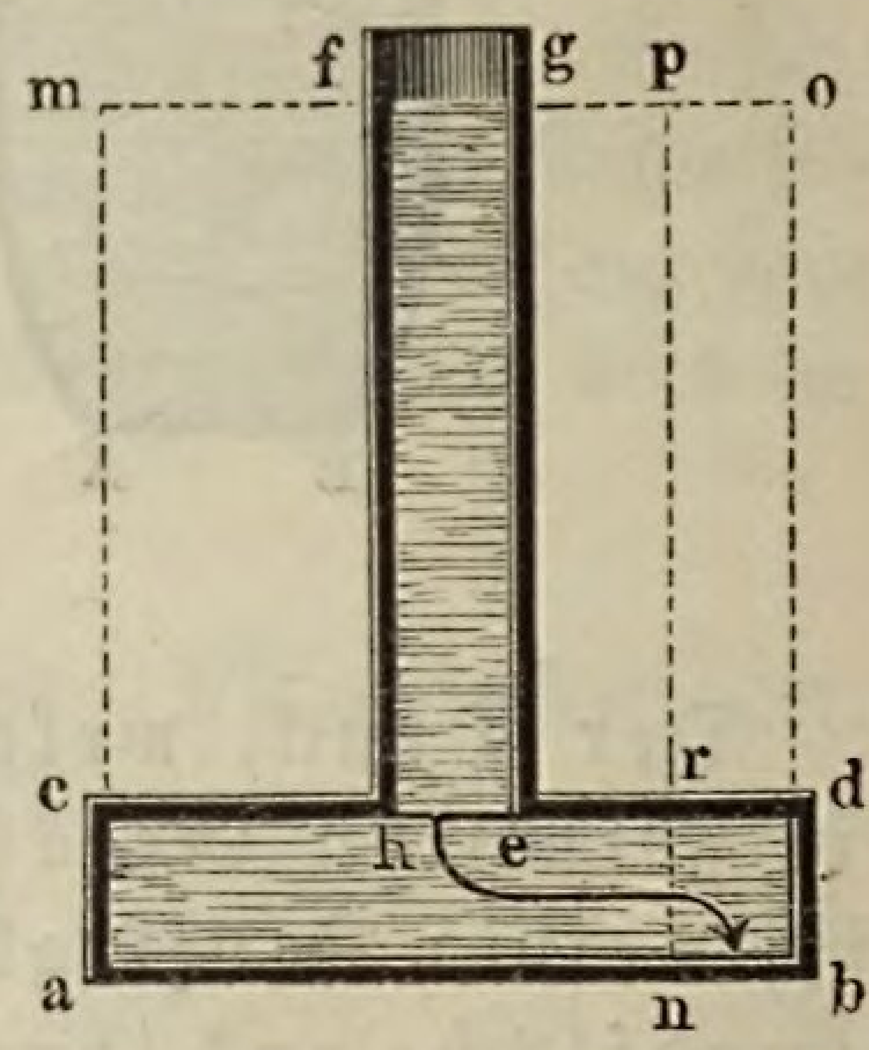


Fig. 76 stellt ein Gefäß dar, dessen oberer Theil durch eine enge Röhre gebildet wird. Das Gefäß sei bis *fg* mit Flüssigkeit gefüllt. Der Boden *ab* hat zunächst das Gewicht der Flüssigkeitssäule *abcd* zu tragen. Diese ist aber selbst durch die Flüssigkeitssäule *hg* gedrückt, deren Gewicht auf die Flüssigkeitsschicht *he* preßt. Der auf *he* lastende Druck pflanzt sich nun durch die Flüssigkeit in *abcd* in der Art gleichförmig fort, daß jeder Theil des Bodens *ab*, welcher, wie z. B. *nb*, eben so groß ist wie *he*, einen dem Gewicht der Flüssigkeitssäule *fghe* gleichen Druck auszuhalten hat. Jedes Flächenstück des Bodens, welches gleich ist *he*, hat demnach einen Gesammtdruck auszuhalten, welcher gleich ist dem Gewicht einer verticalen Flüssigkeitssäule, deren Basis gleich *he*, deren Höhe aber gleich $ac + hf$ ist; daraus folgt nun ferner, daß der Gesammtdruck, welchen der Boden *ab* auszuhalten hat, gleich ist dem Gewichte einer geraden Flüssigkeitssäule, deren Basis *ab* und deren Höhe *am* ist.

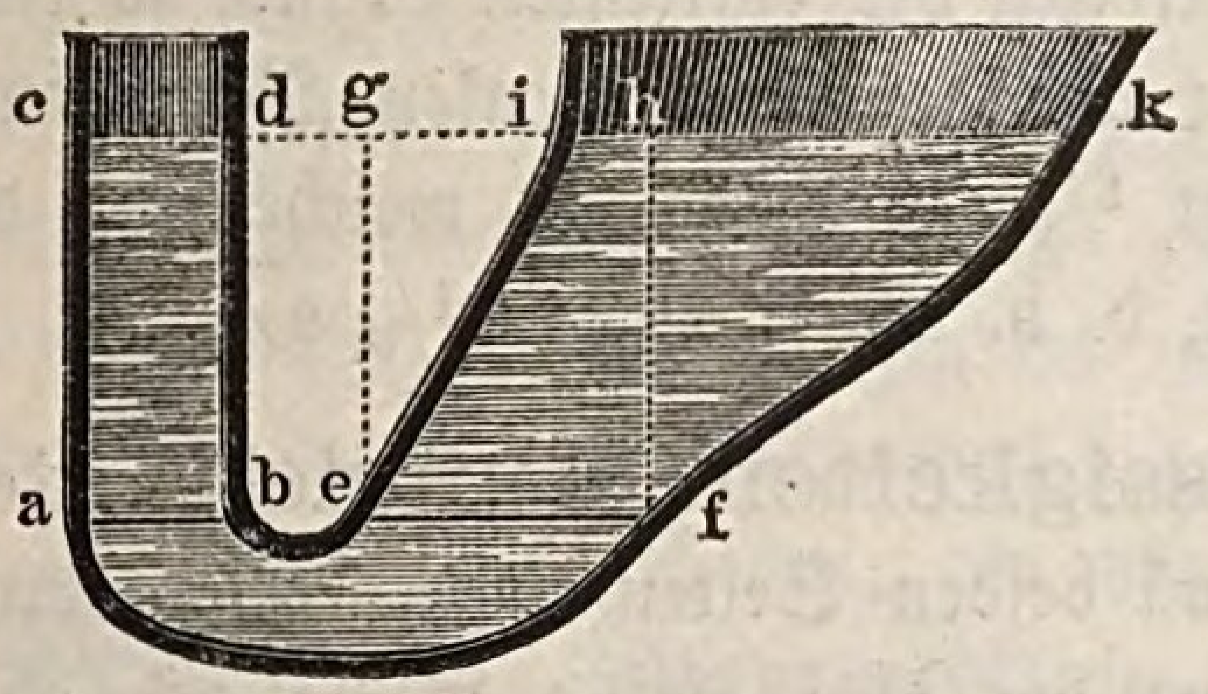
Der eben besprochene und durch Fig. 76 erläuterte Satz läßt sich leicht dahin verallgemeinern, daß derselbe für jedes nach oben verengerte Gefäß giltig ist.

Kurz, der Druck, den der Boden eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes auszuhalten hat, ist von der Form dieses Gefäßes ganz unabhängig, er hängt bloß von der Größe des Bodens und dessen Tiefe unter dem Flüssigkeitsspiegel ab.

Aus dem Gesagten folgt nun ferner, daß der Satz, welcher in §. 35 nur für verticale Röhren bewiesen wurde, ganz allgemein wahr ist, daß nämlich in communicirenden Gefäßen, welche nur eine Flüssigkeit enthalten, für den Fall des Gleichgewichts die Flüssigkeitsspiegel sich in gleicher Höhe befinden

müssen, welches auch sonst die Gestalt der Gefäße sein mag. Dem Druck der Flüssigkeitssäule *abcd*, Fig. 77, wird das Gleichgewicht gehalten, wenn auf *ef* ein Druck wirkt, welcher dem Gewichte der verticalen Flüssigkeitssäule *efgh* gleich ist. Nun aber übt ja, wie wir eben gesehen haben, die unregelmäßig geformte schräge Flüssigkeitssäule *efik* auf ihre Grundfläche *ef* genau denselben Druck aus, wie die gleich hohe gerade Säule *efgh*, folglich muß in der That in beiden Schenkeln unseres Gefäßes die Flüssigkeit gleich hoch stehen, wenn Gleichgewicht stattfinden soll.

Fig. 77.



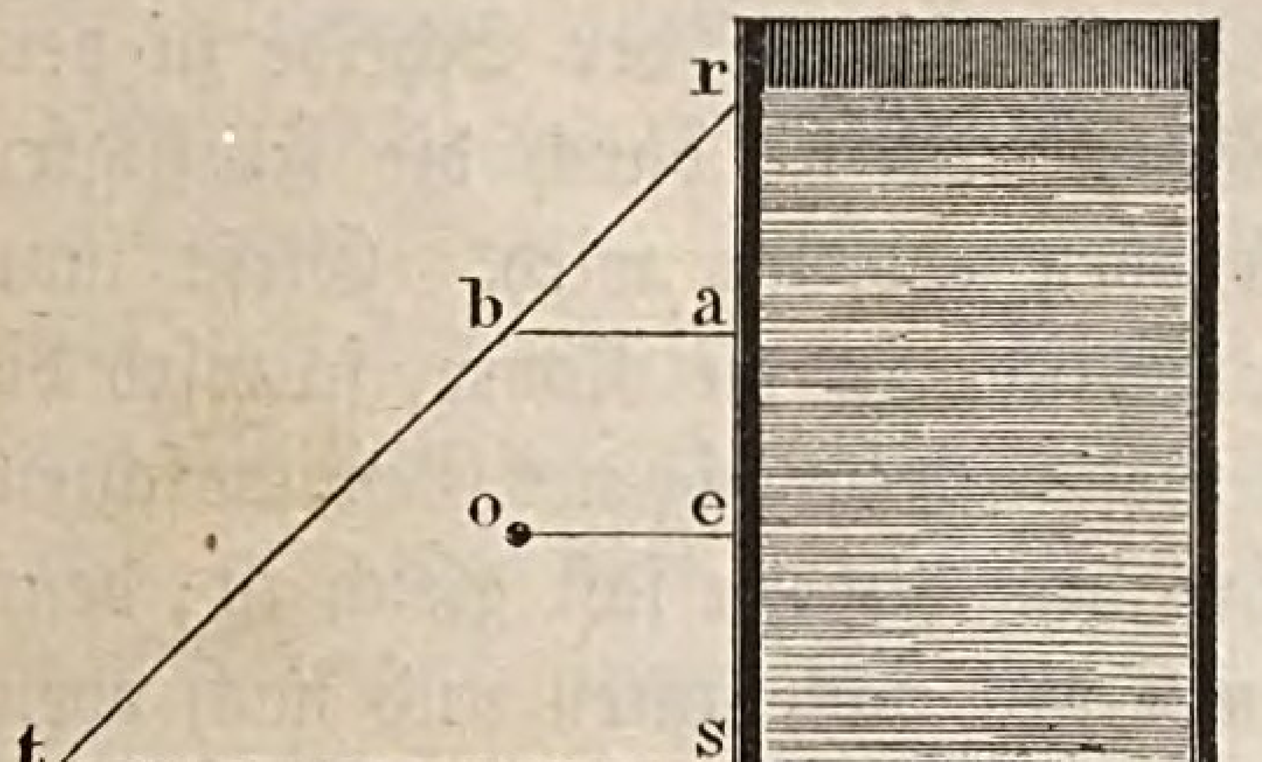
Seitendruck. Es ist eine Folge der gleichförmigen Fortpflanzung des Drucks durch Flüssigkeiten, daß auch die Seitenwände der mit Flüssigkeiten gefüllten Gefäße einen Druck auszuhalten haben, wie sie auch gegen die Horizontale geneigt sein mögen, und zwar erfährt jedes Flächenelement der Seitenwand einen Druck, welcher eben so groß ist, als wenn es bei gleicher Tiefe unter dem Flüssigkeitsspiegel sich in einem horizontalen Boden befände. Ist s der Flächeninhalt eines kleinen Stücks der Seitenwand, h die Tiefe seines Schwerpunktes unter dem Flüssigkeitsspiegel und d das specifische Gewicht der Flüssigkeit, so ist der Druck, den es auszuhalten hat, gleichfalls 38

$$P = s \,.\, h \,.\, d.$$

In einem 10 m hohen Behälter voll Wasser ist der Druck auf 1 qcm der Seitenwand in einer Tiefe von 1 m gleich 100 g, in einer Tiefe von 2 m gleich 200 g, in einer Tiefe von 10 m, also am Boden, gleich 1000 g.

Der Druck, den irgend ein Punkt a der verticalen Wand eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes auszuhalten hat, läßt sich durch Zeichnung (Fig. 78) anschaulich machen. Man ziehe in a eine wagerechte Linie und mache ihre Länge ab gleich der Tiefe des Punktes a unter dem Flüssigkeitsspiegel, die Linie ab stellt alsdann den Druck dar, den der Punkt a auszuhalten hat. Macht man dieselbe Construction für mehrere Punkte der verticalen Linie rs, so werden die Endpunkte aller horizontalen Drucklinien in die Linie rt fallen. Es folgt daraus, daß der Gesammtdruck, welchen die Linie rs der verticalen Gefäßwand auszuhalten hat, durch das Dreieck rst dargestellt wird.

Fig. 78.



Der Angriffspunkt der Resultirenden aller einzelnen Pressungen, welche ein Wandstück auszuhalten hat, heißt **Mittelpunkt des Drucks**. Er liegt immer tiefer als der Schwerpunkt des Wandstücks, weil ja die Stärke des Drucks nach unten wächst. Um den Mittelpunkt des Drucks für die verticale

Linie *rs* zu ermitteln, denke man sich durch den Schwerpunkt *o* des Dreiecks *rst* eine horizontale Linie *oe* gezogen, alsdann ist deren Fußpunkt *e* der gesuchte Mittelpunkt des Drucks. Wir haben hier nur eine Linie *rs* betrachtet; nehmen wir statt derselben einen beliebig breiten Streifen der verticalen Wand, so liegt der Mittelpunkt des Drucks für denselben auf seiner verticalen Mittellinie, und zwar ist seine Höhe über dem Boden $^1/_3$ der Höhe, in welcher sich der Flüssigkeitsspiegel über dem Boden befindet, d. h. es ist $se = {}^1/_3\, sr$.

39 **Druck im Innern der Flüssigkeiten, Auftrieb.** Jede Schicht im Innern einer Flüssigkeit wird von beiden Seiten mit gleicher Kraft gedrückt. Eine horizontale Schicht im Innern der Flüssigkeit z. B. hat von oben das Gewicht der darauf lastenden Flüssigkeitssäule zu tragen; dieser Druck wird aber durch einen ganz gleichen, von den benachbarten Flüssigkeitssäulen herrührenden, von unten her wirkenden aufgehoben. Daß im Innern der Flüssigkeit ein solcher nach oben wirkender Druck wirklich vorhanden ist, läßt sich leicht durch den Versuch zeigen.

Das untere Ende einer ungefähr $1^1/_2$ Zoll weiten Glasröhre, Fig. 79, ist mit einer Messingfassung versehen, deren Rand genau eben abgeschliffen ist. *ab* ist eine Metallscheibe, welche in ihrer Mitte einen Haken hat, so daß man sie an eine Schnur anhängen kann, welche durch die Röhre hindurchgeht. Wenn man die Schnur anzieht, so verschließt die Scheibe die untere Oeffnung der Röhre vollkommen. Auf diese Weise verschlossen, wird die Röhre in das Wasser eingetaucht, wie Fig. 80 zeigt. Man beobachtet nun, daß es nicht mehr nöthig ist, den Faden anzuziehen, um das Herunterfallen der Scheibe zu verhindern, weil sie durch die Flüssigkeit nach oben gedrückt wird. Gießt man aber Wasser in die Röhre, so wird die Scheibe durch ihr eigenes Gewicht fallen, sobald das Niveau des Wassers in der Röhre dem äußern fast gleich ist; denn nun erleidet sie durch die Flüssigkeit gleichen Druck nach unten und nach oben.

Fig. 79.

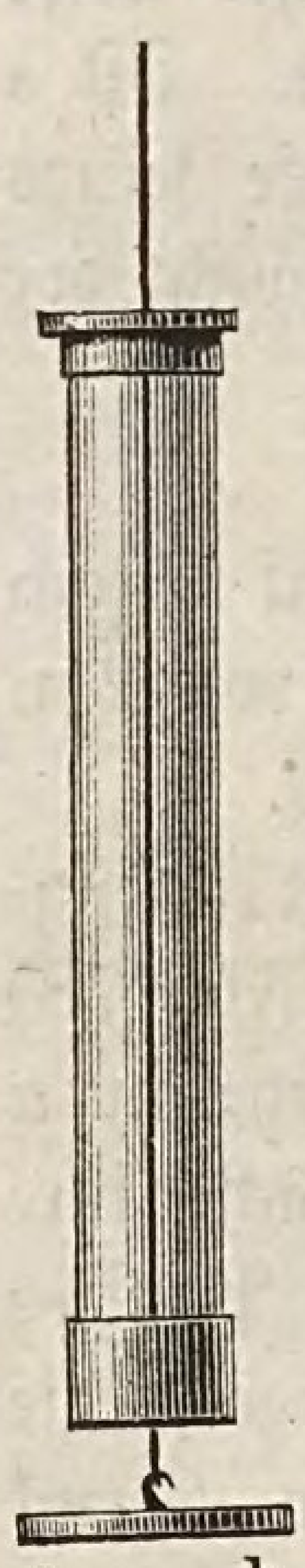
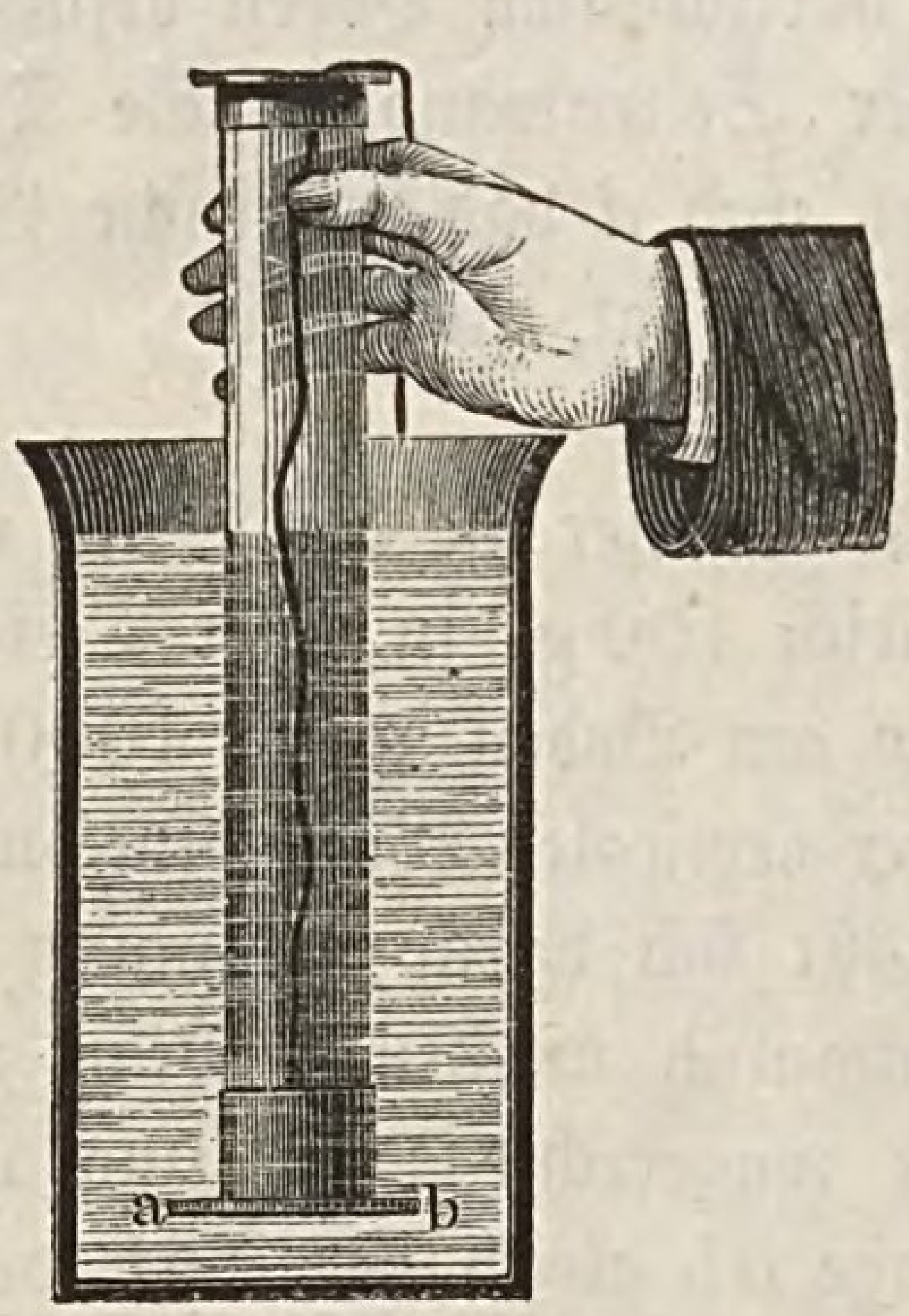


Fig. 80.



Dieser Druck, welchen die untere Fläche jedes in eine Flüssigkeit eingetauchten Körpers auszuhalten hat, und welcher den Körper in die Höhe zu treiben sucht, heißt der Auftrieb.

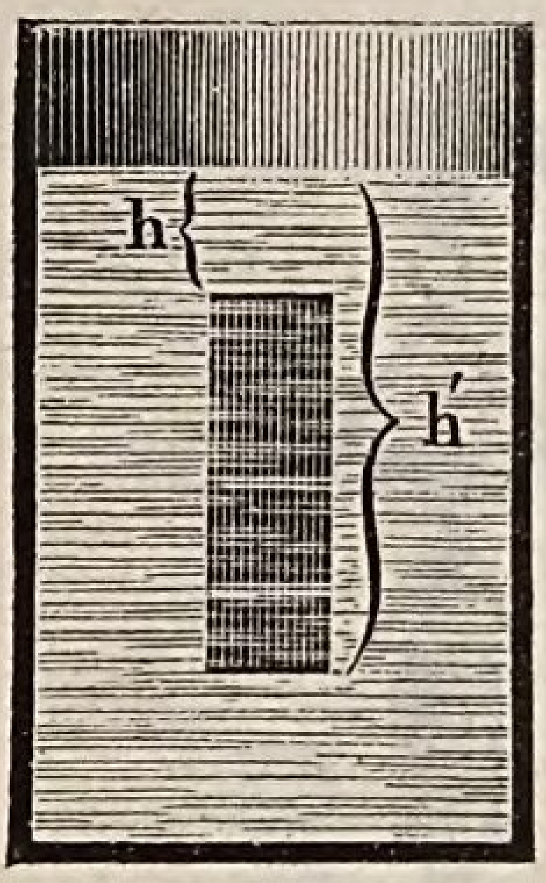
40 **Das archimedische Princip.** In Folge des Auftriebes wird jeder in einer Flüssigkeit untergetauchte Körper einen Theil seines Gewichts verlieren, und zwar ist dieser Gewichtsverlust gerade so groß als das Gewicht der von dem Körper verdrängten Flüssigkeit.

Oder auch: **Wenn ein Körper in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, so trägt die Flüssigkeit so viel von dem Gewichte des Körpers, als die verdrängte Flüssigkeit wiegt.**

Dieses wichtige Gesetz führt nach seinem Entdecker **Archimedes** (287 bis 212 v. Chr.) den Namen des **archimedischen Princips**.

Man kann sich von der Richtigkeit dieses Princips durch eine einfache Betrachtung überzeugen. Wenn ein gerades Prisma vertical in die Flüssigkeit eingetaucht ist, wie es Fig. 81 zeigt, so ist jeder Druck auf die Seitenflächen des Prismas durch einen gleichen und entgegengesetzten aufgehoben, die obere Fläche aber erleidet den Druck einer Flüssigkeitssäule, welche mit dem Prisma gleiche Grundfläche und die Höhe h hat. Die untere Fläche dagegen wird von unten nach oben mit einer Kraft gedrückt, welche dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule von derselben Basis und der Höhe h' gleich ist. Ist d das specifische Gewicht der Flüssigkeit und b die Basis des Prismas, so ist $b.h.d$ der nach unten wirkende, auf der oberen Fläche lastende Druck, dagegen $b.h'.d$ der gegen die untere Fläche des Prismas nach oben wirkende Druck, also $b.(h'-h).d$ der Ueberschuß des letzteren, welchen wir als **Auftrieb** bezeichnet haben. Dieser Auftrieb ist aber gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule von der Basis b und der Höhe $h' - h$, also gleich dem Gewichte der durch das Prisma verdrängten Flüssigkeit.

Fig. 81.



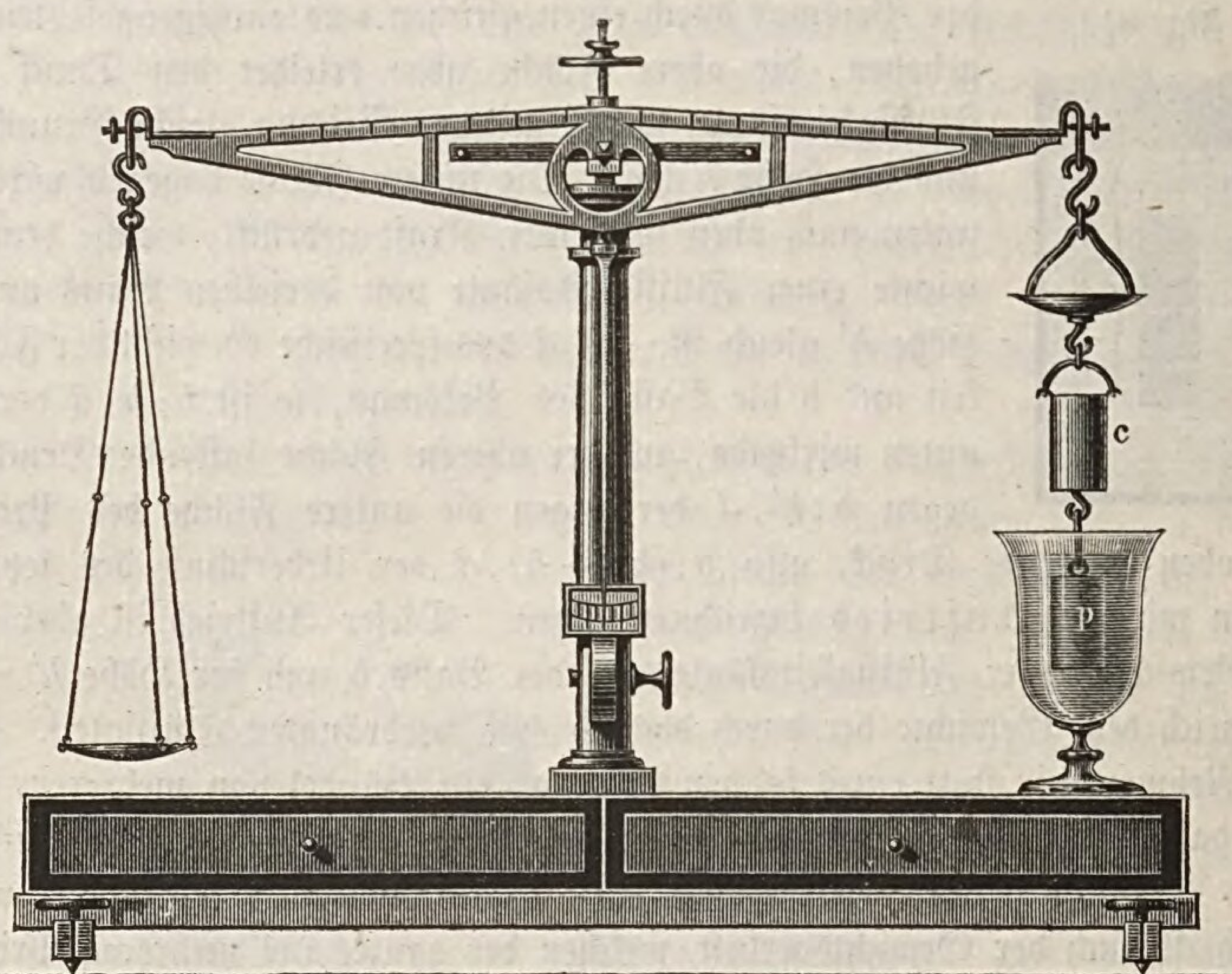
Nehmen wir statt eines solchen Prismas ein Bündel von mehreren, so ist klar, daß jedes einzelne Prisma durch das Eintauchen in die Flüssigkeit von seinem Gewichte so viel verliert, als ein gleiches Volumen Flüssigkeit wiegt; folglich ist auch der Gewichtsverlust, welchen der ganze, aus mehreren Prismen zusammengesetzte Körper erleidet, gleich dem Gewicht einer Flüssigkeitsmasse, deren Volumen dem Gesammtvolumen aller Prismen gleich ist. Da man sich aber einen jeden Körper aus einer Menge solcher vertical stehender Prismen von sehr kleinem Durchmesser zusammengesetzt denken kann, so läßt sich unser Schluß auf jeden beliebigen Körper ausdehnen.

Eine ganz andere Schlußweise führt uns zu demselben Resultate. Denken wir uns, der Raum, den der in die Flüssigkeit eingetauchte Körper einnimmt, sei selbst mit der Flüssigkeit angefüllt, so wird dieser Flüssigkeitskörper in der übrigen Flüssigkeitsmasse schweben; er wird nicht steigen und nicht sinken. Denken wir uns nun den Flüssigkeitskörper durch einen anderen ersetzt, der bei gleichem Volumen gleiches Gewicht mit dem Flüssigkeitskörper hat, so wird auch dieser schweben, sein ganzes Gewicht wird also durch die Flüssigkeit, in welche er eingetaucht ist, getragen. Somit ist klar, daß allgemein von dem Gewichte eines jeden in eine Flüssigkeit eingetauchten Körpers so viel durch die Flüssigkeit getragen wird, als die verdrängte Flüssigkeit selbst wiegt.

Von der Richtigkeit des **archimedischen Princips** kann man sich auch direct durch den Versuch überzeugen. Nachdem die eine Wagschale einer gewöhnlichen Wage durch eine kürzere ersetzt worden ist, wird an diese ein hohler

Cylinder *c*, Fig. 82, angehängt, an welchem wieder ein massiver Cylinder *p* hängt, welcher genau die Höhlung des oberen ausfüllt. Auf die andere Wagschale legt man so viel Gewichte, daß das Gleichgewicht hergestellt ist. Taucht man nun den Cylinder *p* in Wasser, so verliert er dadurch einen Theil seines Gewichtes, und das Gleichgewicht ist gestört. Um es von Neuem wieder herzustellen, braucht man nur den Cylinder *c* voll Wasser zu gießen, was offenbar zeigt, daß *p* durch das Eintauchen in Wasser gerade so viel an Gewicht

Fig. 82.



verloren hat, als das Wasser wiegt, welches den Cylinder *c* ausfüllt. Das Volumen des in *c* befindlichen Wassers ist aber dem Volumen des Wassers gleich, welches der Cylinder *p* verdrängt; mithin ist der Gewichtsverlust gleich dem Gewichte des verdrängten Wassers.

Bezeichnen wir das Gewicht eines Körpers mit G, den Gewichtsverlust, den er durch Eintauchen in die Flüssigkeit erleidet, mit W, so ist die Kraft K, mit welcher der Körper sinkt,

$$K = G - W \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Sobald nun der Körper schwerer ist als ein gleiches Volumen der Flüssigkeit, so lange also $G > W$, ist der Werth von K positiv, der Körper wird wirklich sinken und kann erst ins Gleichgewicht kommen, wenn er auf dem Boden liegt oder auf andere Weise aufgehalten wird.

Ist $G = W$, so ist $K = 0$, der Körper wird in der Flüssigkeit schweben, ohne zu sinken, aber auch ohne zu steigen.

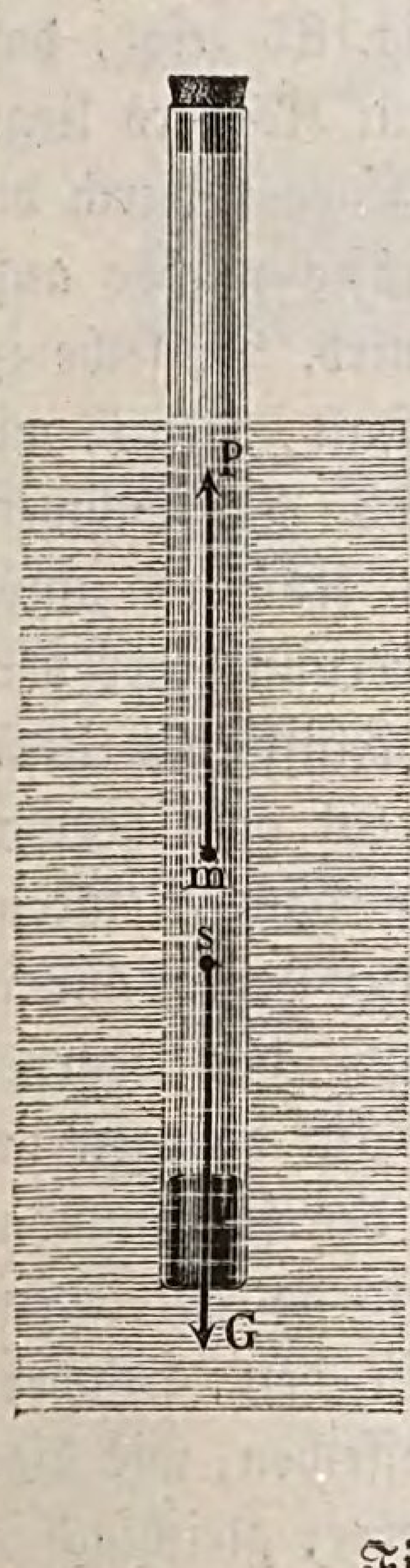
Ist aber endlich $G < W$, d. h. ist der eingetauchte Körper leichter als ein gleiches Volumen Flüssigkeit, so wird K negativ, der Körper wird nicht sinken, sondern durch das Ueberwiegen des Auftriebs in die Höhe steigen.

Der Gleichgewichtszustand kann erst eintreten, wenn der Körper so weit über die Oberfläche der Flüssigkeit hervorragt, daß das Gesammtgewicht des Körpers gleich ist dem Gewichte der durch den eingetauchten Theil verdrängten Flüssigkeit: der Körper wird also schwimmen.

Auf einen schwimmenden Körper wirken zwei Kräfte in entgegengesetzter Richtung: sein eigenes Gewicht, welches im Schwerpunkt des Körpers angreift und ihn nach unten zieht, dann der Auftrieb, der ihn nach oben treibt und im Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit, d. h. in dem Punkte angreift, welcher der Schwerpunkt des eingetauchten Körpertheils sein würde, wenn dieses eingetauchte Stück eine vollkommen gleichartige Masse wäre. Den Angriffspunkt des Auftriebs bezeichnet man auch als Mittelpunkt des Flüssigkeitsdrucks.

Es schwimme z. B. auf Wasser eine unten zugeschmolzene, durch Schrotkörner oder Quecksilber beschwerte Glasröhre (Fig. 83), so greift in deren Schwerpunkt s ihr Gewicht sG an, welches den Punkt s nach unten zieht, dagegen greift in dem Punkte m, welcher der Schwerpunkt des verdrängten Wassers ist, der Auftrieb mP an und sucht den Punkt m nach oben zu bewegen.

Fig. 83.



Ein schwimmender Körper ist im Gleichgewicht, wenn sich das Gewicht des Körpers und der Auftrieb der verdrängten Flüssigkeit das Gleichgewicht halten; dies ist der Fall, wenn diese beiden Kräfte, z. B. sG und mP (Fig. 83) einander gleich sind und in eine und dieselbe verticale Angriffslinie PG fallen. Wäre die erste Bedingung nicht erfüllt, so müßte der Körper entweder steigen, oder sinken; wenn aber die zweite nicht erfüllt wäre, so müßte sich der Körper drehen. Die verticale Gerade PG (Fig. 83) oder ba (Fig. 84), welche für den Fall des Gleichgewichts durch den Schwerpunkt des schwimmenden Körpers und den der verdrängten Flüssigkeit hindurchgeht, wird Schwimmaxe genannt. Wird das Gleichgewicht gestört, indem man den schwimmenden Körper dreht (Fig. 85), so erhält die

Fig. 84.

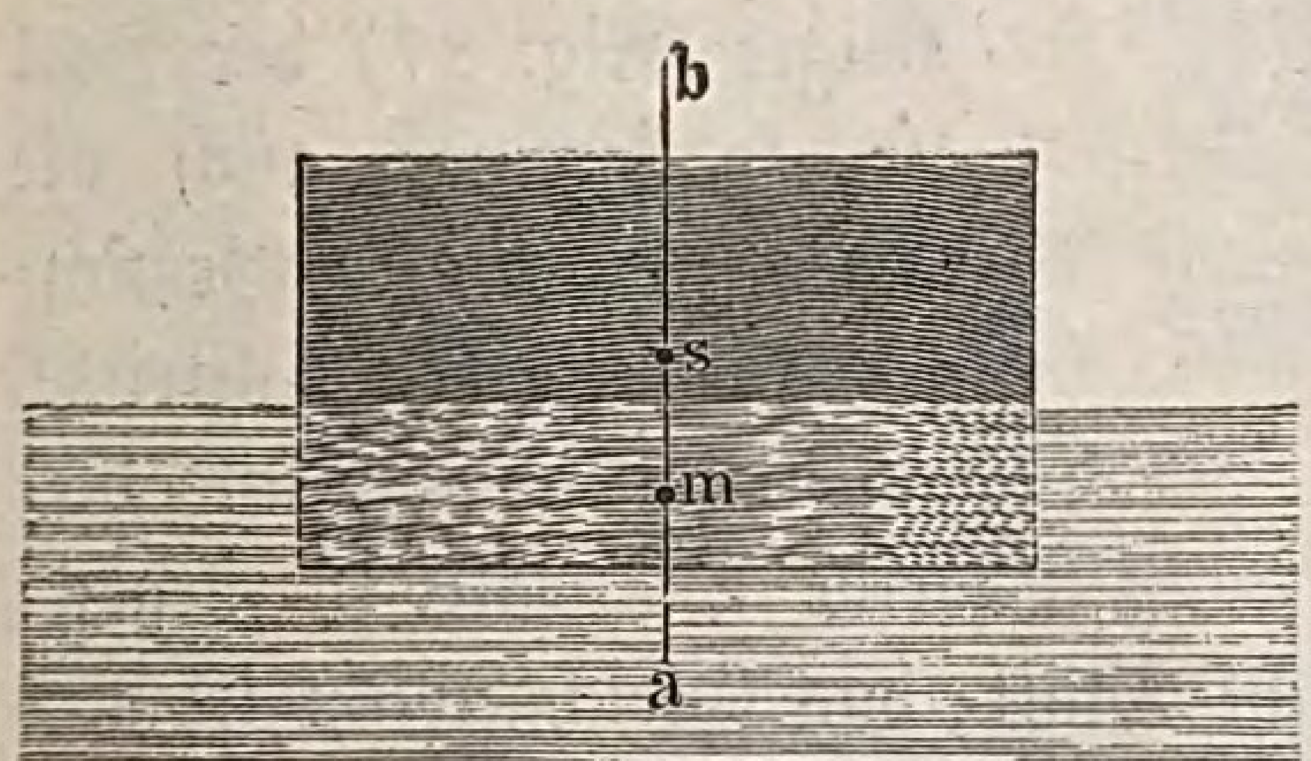
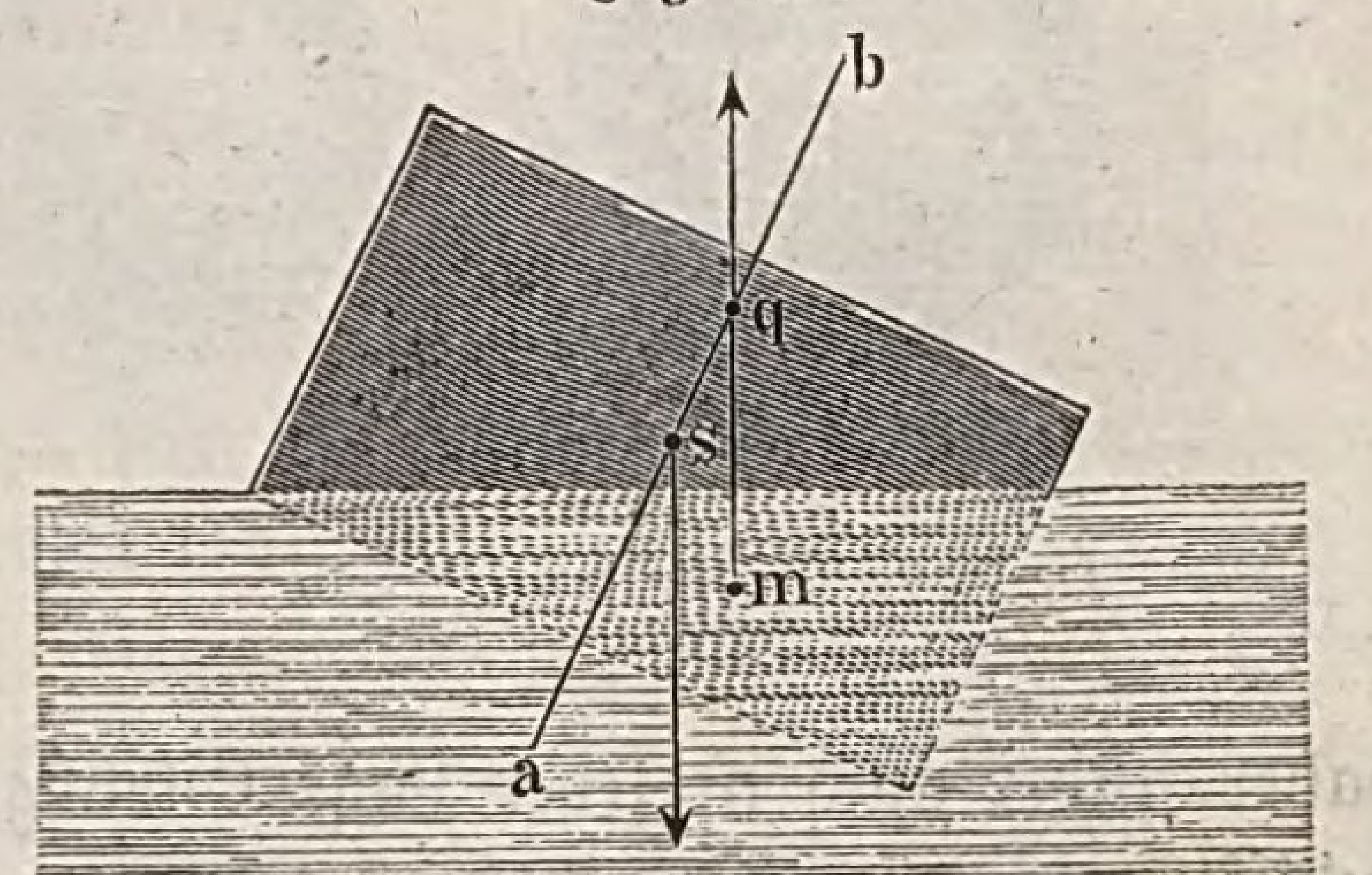


Fig. 85.



Schwimmaxe eine geneigte Richtung ba, zugleich aber nimmt der Angriffspunkt des Auftriebs einen anderen Ort ein, er rückt in unserm Beispiel in den Punkt m. Eine durch den neuen Angriffspunkt des Auftriebs gezogene Verticale schneidet die Schwimmaxe in einem Punkte q, welchen man das Metacentrum nennt.

Wie für unterstützte Körper, so giebt es auch für schwimmende drei Arten des Gleichgewichts: ein stabiles, ein labiles und ein indifferentes. Die Art des Gleichgewichts hängt von der Lage des Metacentrums zum Schwerpunkt des schwimmenden Körpers ab. Dasselbe ist nämlich stabil, labil oder indifferent, je nachdem das Metacentrum bei einer kleinen Drehung des schwimmenden Körpers über, unter, oder in dessen Schwerpunkt fällt.

Denkt man sich den schwimmenden Körper Fig. 84 in die Lage der Fig. 85 gedreht, so fallen Gewicht und Auftrieb nicht mehr in dieselbe Verticale und suchen daher den schwimmenden Körper zu drehen. Die Fig. 85 zeigt, daß das Metacentrum q über dem Schwerpunkte des schwimmenden Körpers liegt, und der Körper durch die beiden Kräfte wieder aufgerichtet wird. Dasselbe ist auch der Fall, wenn, wie in Fig. 83 der Schwerpunkt des Körpers unter dem Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit liegt. Aus Fig. 86 geht hervor, daß, wenn das Metacentrum q unter dem Schwerpunkt liegt, der Körper umfällt. Fällt dagegen bei jeder Lage des schwimmenden Körpers das Metacentrum q in den Schwerpunkt s desselben, wie dies z. B. bei einer gleichmäßig schweren, schwimmenden Kugel (Fig. 87) der Fall ist, so kommen auch die Angriffspunkte des Gewichtes sG und des Auftriebs mP stets in eine und dieselbe Verticale zu liegen; daher findet auch in jeder Lage Gleichgewicht Statt; das Gleichgewicht ist also indifferent.

Fig. 86.

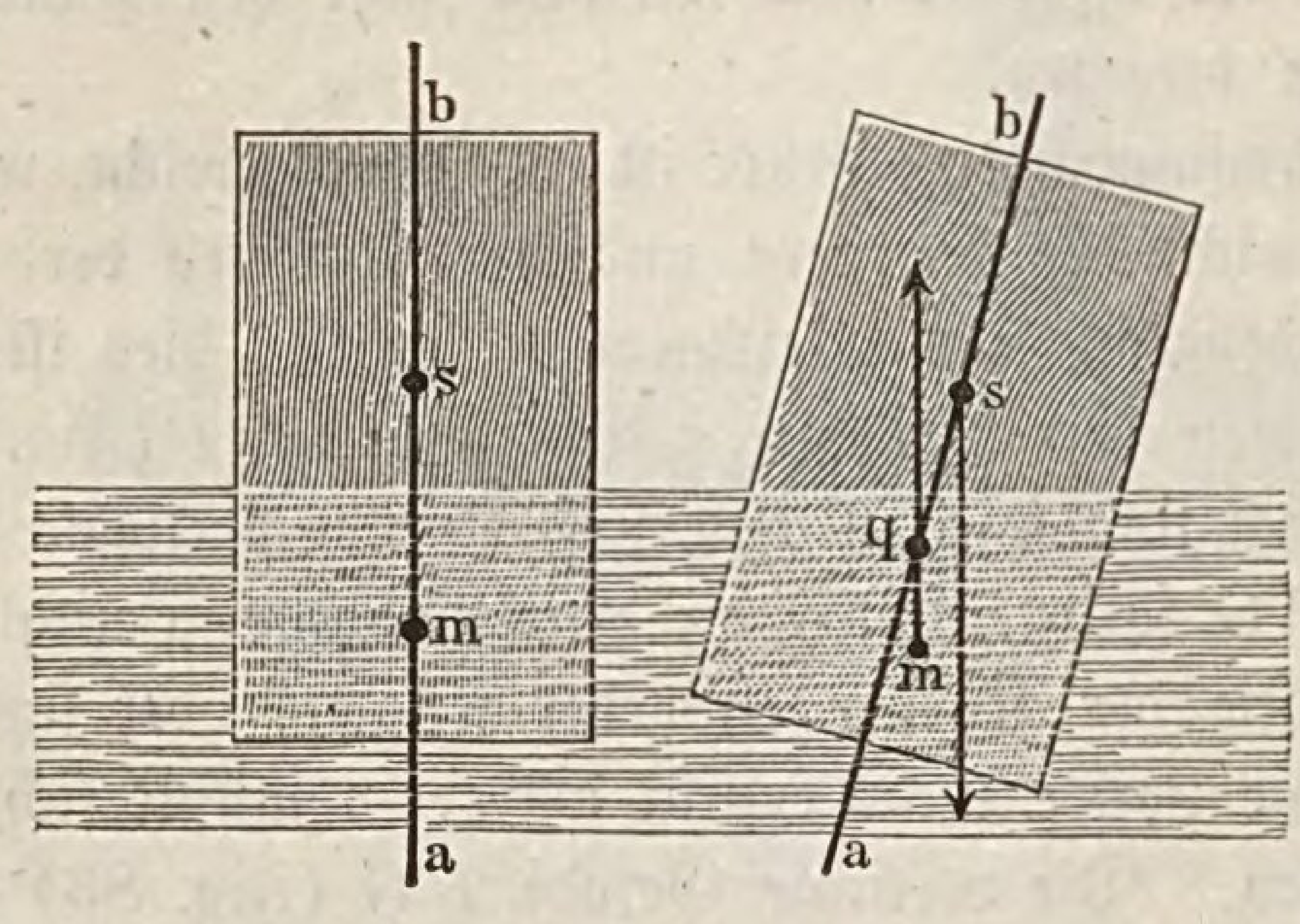
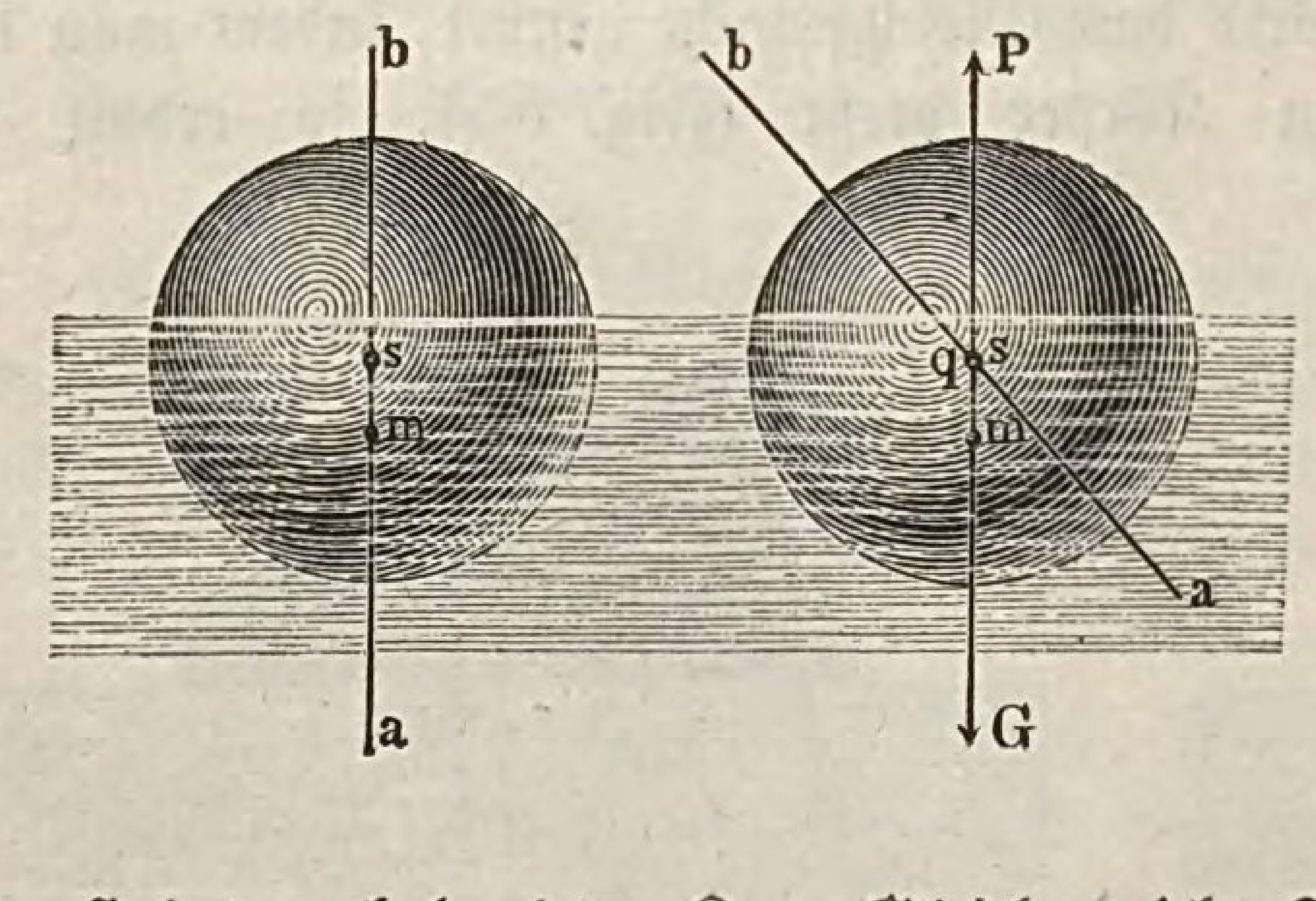
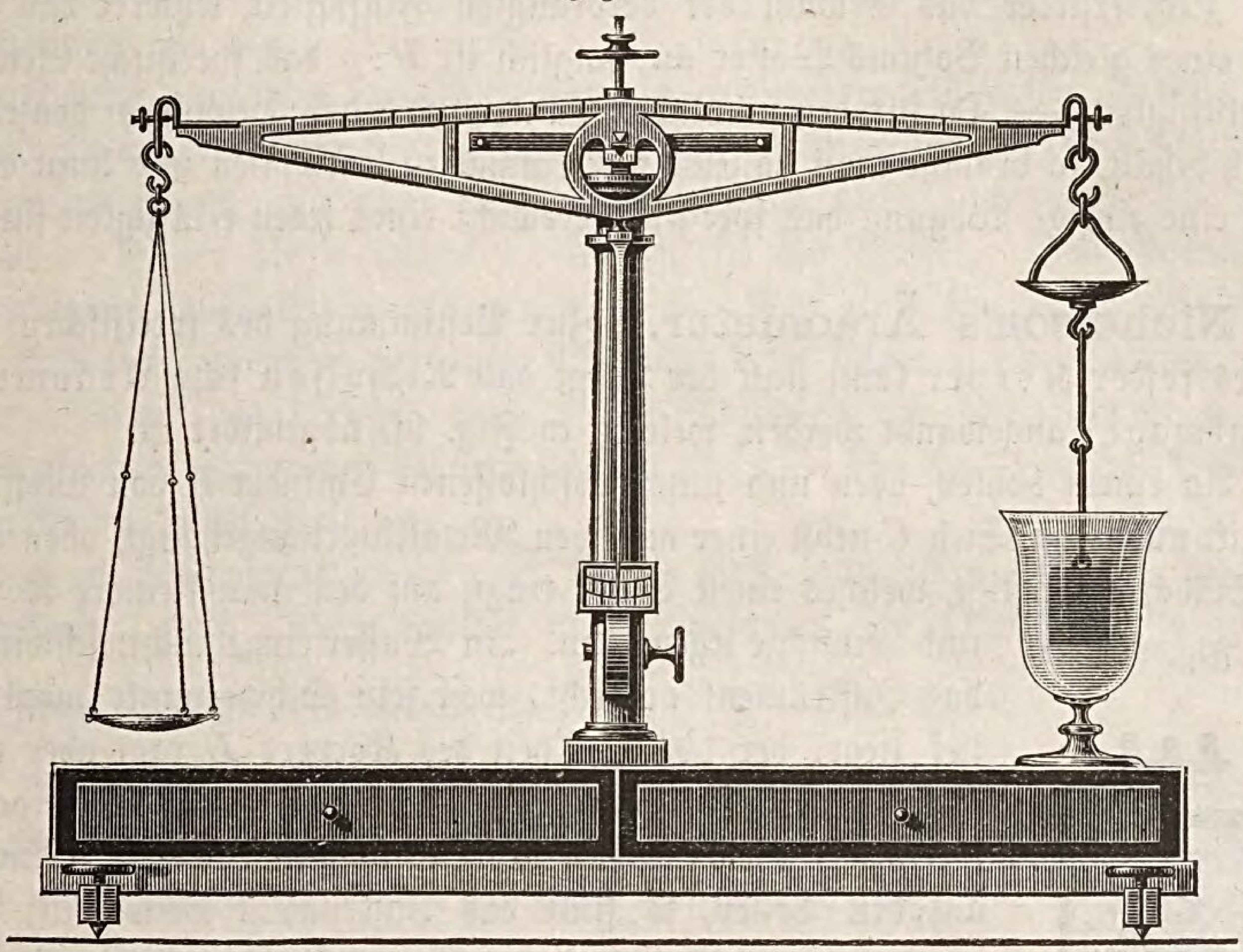


Fig. 87.



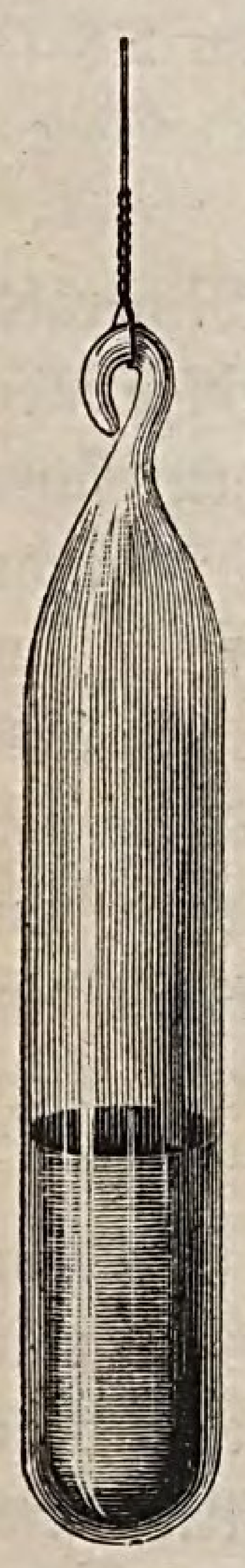
Anwendung des archimedischen Princips. Das archimedische Princip bietet uns ein bequemes Mittel, das specifische Gewicht fester 41

Fig. 88.



und flüssiger Körper zu bestimmen. Zu diesem Zwecke kann man sich der hydrostatischen Wage (Fig 88) bedienen, welche sich leicht aus einer gleicharmigen Wage dadurch herstellen läßt, daß man die eine Wagschale durch eine kürzere ersetzt, an der sich unten ein Häkchen befindet.

Fig. 89.



Um das specifische Gewicht eines festen Körpers zu bestimmen, hängt man denselben mittelst eines möglichst feinen Drahtes an die kürzere Wagschale an und bestimmt durch Auflegen von Gewichten auf die längere Wagschale das absolute Gewicht P des Körpers. Hierauf läßt man den letzteren in Wasser eintauchen und bringt die Wage wieder ins Gleichgewicht dadurch, daß man auf die kürzere Wagschale ein Gewicht p zulegt. Dieses Gewicht ist gleich dem Gewichtsverlust des Körpers im Wasser und nach dem archimedischen Princip auch gleich dem Gewichte des Wassers, welches denselben Raum einnimmt wie der Körper. Das specifische Gewicht eines Körpers wird aber gefunden (§. 9), wenn man das Gewicht des Körpers durch das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser dividirt; demnach ist $P:p$ das gesuchte specifische Gewicht.

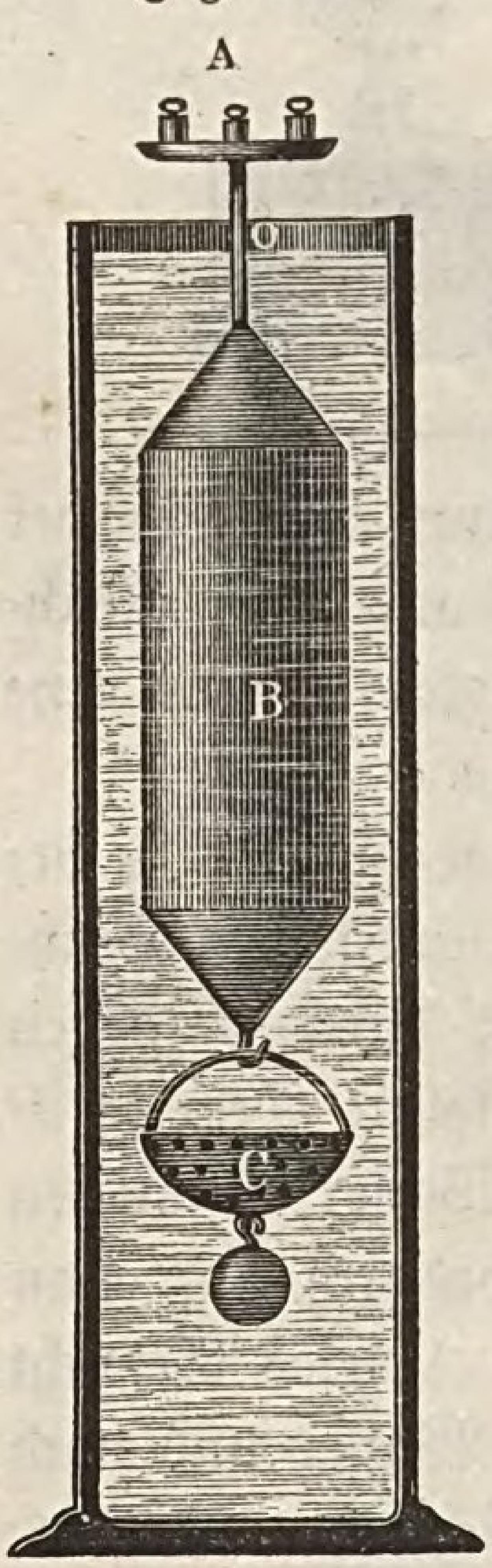
Um das specifische Gewicht einer Flüssigkeit zu bestimmen, hängt man eine mit Quecksilber oder Schrot beschwerte zugeschmolzene Glasröhre (Fig. 89) mittels eines feinen Drahtes an die kürzere Schale der hydrostatischen Wage und bringt dieselbe ins Gleichgewicht. Man läßt hierauf den Glascylinder erst in die Flüssigkeit und dann in Wasser vollständig einsinken und bestimmt jedesmal den

Gewichtsverlust des Cylinders dadurch, daß man die Wage ins Gleichgewicht bringt. Der Gewichtsverlust in der Flüssigkeit sei P, der im Wasser p. Nun giebt ersterer das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit, letzterer das Gewicht eines gleichen Volums Wasser an; folglich ist $P:p$ das specifische Gewicht der Flüssigkeit. — Da für den nämlichen Glascylinder das Gewicht p denselben Werth behält, so braucht man dasselbe nur einmal zu bestimmen und kann dann durch eine einzige Wägung das specifische Gewicht einer jeden Flüssigkeit finden.

42 **Nicholson's Aräometer.** Zur Bestimmung des specifischen Gewichtes fester Körper kann statt der Wage das Nicholson'sche Aräometer (Senkwage) angewandt werden, welches in Fig. 90 abgebildet ist.

An einem hohlen, oben und unten geschlossenen Cylinder B von Messingblech ist unten ein Sieb C nebst einer massiven Metallkugel angehängt, oben aber ein Stäbchen befestigt, welches einen Teller trägt, auf den man kleinere Körper und Gewichte legen kann. In Wasser eingetaucht, schwimmt das Instrument aufrecht, weil sein Schwerpunkt möglichst tief liegt, der oberste Theil des Körpers B ragt aber noch aus dem Wasser heraus. Legt man nun den Körper, dessen specifisches Gewicht man bestimmen will, etwa ein Mineral, auf den Teller, so sinkt das Instrument weiter ein, und durch ferneres Auflegen von Tarirgewichten kann man es leicht dahin bringen, daß es genau bis zu einem Punkte O eingesenkt ist, welchen man auf irgend eine Weise (gewöhnlich durch einen Feilstrich) auf dem Stäbchen bezeichnet hat. Man nimmt nun das Mineral weg und legt statt dessen so viel Gewicht auf, daß das Instrument wieder genau bis O einsinkt. Auf diese Weise erhält man das absolute Gewicht des Körpers. Es betrage P Gramme.

Fig. 90.



Hat man auf diese Weise das absolute Gewicht des Minerals bestimmt, so läßt man sämmtliche Gewichte auf dem Teller und legt den Körper in das Sieb. Das Instrument sinkt nun nicht wieder bis O ein, weil der im Sieb C liegende Körper dadurch, daß er jetzt in Wasser eingetaucht ist, an Gewicht verliert. Man wird also auf den Teller noch Gewichte, z. B. p Gramme, auflegen müssen, damit das Instrument wieder bis zur Marke einsinkt. Diese p Gramme sind der Gewichtsverlust des Körpers im Wasser, folglich auch das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser. Man kennt nun das absolute Gewicht P des Körpers und das Gewicht p eines gleichen Volumens Wasser; folglich ist das gesuchte specifische Gewicht $P : p$.

Auch das specifische Gewicht von Flüssigkeiten kann man mit dem Nicholson'schen Aräometer bestimmen. Da das Instrument stets so weit einsinkt, daß das Gewicht desselben sammt den Gewichten auf dem Teller dem der verdrängten Flüssigkeit gleich ist, so kann man mit Hülfe dieses Instruments ermitteln, wie viel ein bestimmtes Volumen der Flüssigkeit wiegt. Dazu ist

aber nöthig, daß man das Gewicht des Instruments selbst kennt; dies Gewicht sei g. Wenn das Instrument, in Wasser eingetaucht, bis O einsinken soll, so muß noch das Gewicht a zugelegt werden. Das Gewicht der verdrängten Wassermasse ist also $g + a$.

Taucht man nun das Instrument in eine andere Flüssigkeit, so wird man irgend ein anderes Gewicht b anstatt a auflegen müssen, um ein Einsinken bis O zu bewerkstelligen und zwar wird b größer sein als a, wenn die Flüssigkeit schwerer, kleiner als a, wenn sie leichter ist als Wasser. Das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist alsdann $g + b$. Nun sinkt bei beiden Wägungen das Aräometer gleich tief ein und verdrängt beide Male gleiche Volume. Man kennt demnach das Gewicht $g + b$ der Flüssigkeit und das Gewicht $g + a$ eines gleichen Volumens Wasser; folglich ist $(g + b) : (g + a)$ das specifische Gewicht der Flüssigkeit.

Das Instrument wiege z. B. 70 g; muß man 20 g auflegen, damit es in Wasser, und 1,37 g, damit es in Weingeist bis O einsinkt, so ist das specifische Gewicht des Weingeistes $\frac{70 + 1{,}37}{70 + 20} = 0{,}793$.

Die Senkwage ist zwar um so empfindlicher, je dünner das Stäbchen im Vergleich zum eingetauchten Volumen ist, allein gar zu dünn darf man es doch nicht machen, weil sonst das geringste, zu viel aufgelegte Gewicht das Instrument ganz untersinken macht.

Es ist immer etwas umständlich, mit diesem Aräometer das specifische Gewicht von Flüssigkeiten zu bestimmen. Man könnte ebenso schnell mit Hülfe der Wage nach dem schon früher angegebenen Verfahren mit weit größerer Genauigkeit zum Ziele kommen. In vielen Fällen des praktischen Lebens aber kommt es darauf an, schnell durch ein möglichst einfaches Verfahren das specifische Gewicht einer Flüssigkeit auszumitteln, um daraus auf die Qualität derselben zu schließen. In solchen Fällen reicht es aber vollkommen hin, das specifische Gewicht bis auf zwei Decimalstellen genau zu finden; man erreicht dies am schnellsten durch die Scalenaräometer, die wir nun näher betrachten wollen.

Scalenaräometer. Mittelst des Nicholson'schen Aräometers wird das specifische Gewicht einer Flüssigkeit aus der Vergleichung des absoluten Gewichtes gleicher Volumina abgeleitet. Der Gebrauch der Scalenaräometer aber gründet sich auf die Vergleichung der Volumina gleicher Gewichtsmengen verschiedener Flüssigkeiten. 43

Fig. 91 (a. f. S.) stellt ein Scalenaräometer dar. In der Regel besteht ein solches aus einem schwimmenden Hohlkörper von Glas oder Metall, welcher oben in eine genau cylindrische Glasröhre, unten dagegen in eine mit Schrot oder Quecksilber beschwerte Kugel endigt; durch letztere wird nur bezweckt, daß das Instrument aufrecht schwimmt. Denken wir uns das letztere im Wasser schwimmend, so ist das Gewicht des verdrängten Wassers dem Gewichte des Instruments gleich. Senken wir es nun in eine andere Flüssigkeit, so sinkt

es auch darin so tief ein, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit gleich dem des Instruments ist; das Instrument wird also in der Flüssigkeit tiefer oder weniger tief einsinken, je nachdem sie specifisch leichter oder schwerer ist als Wasser. Gesetzt, das Aräometer wiege 10 g, so wird es, in Wasser schwimmend, 10 ccm verdrängen. Taucht man es in Weingeist, so wird es so tief einsinken, daß die verdrängte Weingeistmenge auch 10 g wiegt. Aber 10 g Weingeist nehmen einen größeren Raum ein als 10 g Wasser, das Instrument muß also tiefer einsinken. Bezeichnet man überhaupt das specifische Gewicht zweier Flüssigkeiten mit d und d', die Flüssigkeitsvolume, welche das schwimmende Aräometer verdrängt, mit V und V' und das Gewicht desselben mit G, so sind die Gewichte der verdrängten Flüssigkeiten Vd und $V'd'$, und da diese gleich G sind, so hat man

$$G = Vd = V'd'$$

daher auch

$$V : V' = d' : d$$

d. h. die von dem schwimmenden Aräometer verdrängten Volume verhalten sich umgekehrt wie die specifischen Gewichte der Flüssigkeiten.

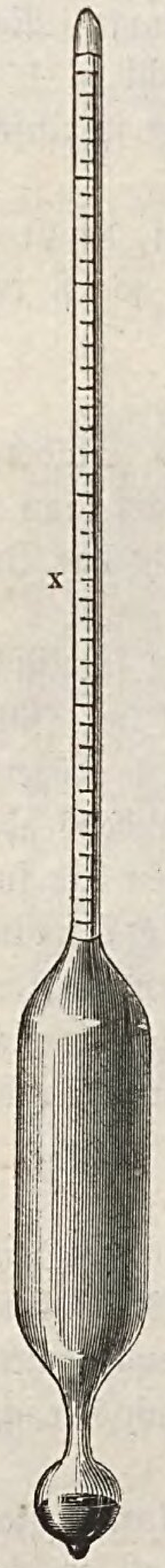


Fig. 91.

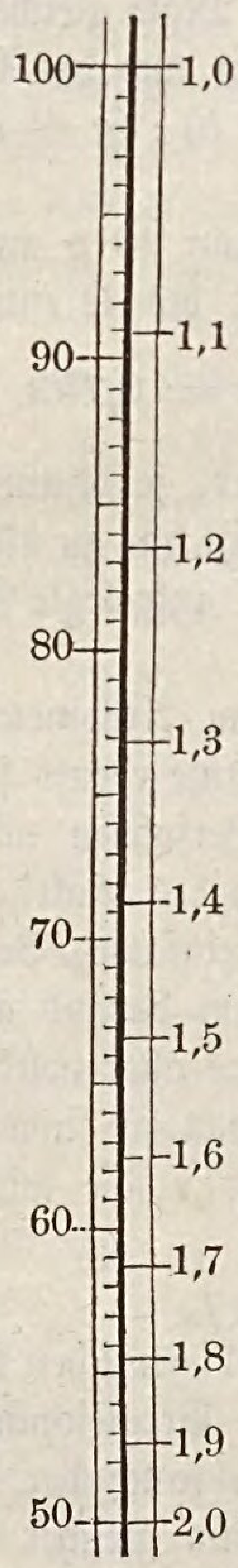


Fig. 92.

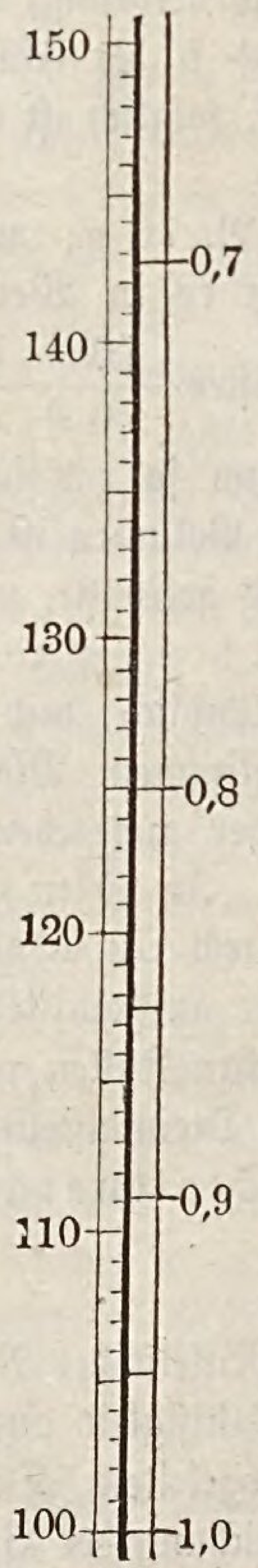


Fig. 93.

Um mit Hülfe eines solchen Instruments das specifische Gewicht einer Flüssigkeit ermitteln zu können, muß die Röhre mit einer zweckmäßigen Theilung versehen sein. Eine solche ist nun die von Gay-Lussac angegebene Volumeterscala.

Um diese Scala zu erhalten, wird zunächst derjenige Punkt x der Röhre bezeichnet, bis zu welchem das Instrument im Wasser einsinkt, alsdann auf der Röhre, von diesem Punkte ausgehend, eine Reihe von Theilstrichen so angebracht, daß das Volumen eines zwischen je zwei aufeinander folgenden Theilstrichen fallenden Röhrenstücks, $^1/_{100}$ von dem im Wasser einsinkenden Volumen ist. Es

sei z. B. das Volumen desjenigen Theils des Aräometers, welcher im Wasser untergetaucht ist, gerade 10 ccm, so müßte das Volumen des Röhrenstücks, welches zwischen je zwei Theilstriche fällt, 0,1 ccm betragen.

Der Wasserpunkt x wird mit 100 bezeichnet und die Theilung von unten nach oben gezählt. Die auf diese Weise getheilten Aräometer werden mit dem besonderen Namen Volumeter bezeichnet.

Gesetzt, das Aräometer sänke in irgend einer Flüssigkeit bis zum Theilstrich 80 der Volumeterscala ein, so weiß man dadurch, daß 80 Volumtheile dieser Flüssigkeit so viel wiegen wie 100 Volumtheile Wasser; das specifische Gewicht dieser Flüssigkeit verhält sich also zu dem des Wassers wie 100 zu 80, es ist also $\frac{100}{80}$ oder 1,25.

Wäre das Volumeter in einer anderen Flüssigkeit bis zum Theilstrich 116 der Volumeterscala eingesunken, so wäre das specifische Gewicht dieser Flüssigkeit $\frac{100}{116} = 0{,}862$. Kurz, wenn das Volumeter in einer Flüssigkeit bis zu einem bestimmten Punkte y der Scala einsinkt, so findet man das specifische Gewicht s der Flüssigkeit, wenn man die Zahl des beobachteten Scalenpunktes in 100 dividirt, d. h. es ist $s = \frac{100}{y}$.

Die Genauigkeit eines solchen Instruments ist um so größer, je größer die Entfernung eines Theilstriches vom anderen, je dünner also die Röhre im Vergleich zu dem Volumen des ganzen Instrumentes ist. Damit jedoch die Röhre nicht gar zu lang wird, macht man kein Volumeter, welches für alle Flüssigkeiten anwendbar ist, sondern solche, welche entweder nur für leichtere oder nur für schwerere Flüssigkeiten gebraucht werden können. Bei den ersteren befindet sich der mit 100 bezeichnete Wasserpunkt nahe am unteren, bei den letzteren aber nahe am oberen Ende der Röhre.

Noch bequemer für den Gebrauch ist die Densimeterscala, d. h. eine Scala, an welcher man unmittelbar die specifischen Gewichte ablesen kann, deren Theilstriche also mit dem ihnen entsprechenden specifischen Gewichte bezeichnet sind. An einem Densimeter also, welches für leichtere Flüssigkeiten bestimmt ist, sind die Punkte markirt, bis zu welchen das Instrument in Flüssigkeiten einsinken muß, deren specifisches Gewicht 1; 0,99; 0,98; 0,97 ... 0,90; 0,89 u. s. w. ist.

Fig. 92 zeigt die Hauptabtheilungen einer Densimeterscala für schwere, Fig. 93 einer solchen für leichtere Flüssigkeiten und neben denselben links die entsprechenden Stücke der Volumeterscala.

Procent-Aräometer. Im praktischen Leben ist es nicht direct der 44
Zweck, das specifische Gewicht einer Flüssigkeit zu erfahren, sondern man will den Concentrationsgrad einer Salzlösung oder das Mischungsverhältniß zweier Flüssigkeiten kennen lernen. Diese stehen nun freilich mit dem specifischen Gewichte in genauer Beziehung, so daß, wenn man mit Hülfe des Aräometers

das specifische Gewicht einer Flüssigkeit ermittelt hat, man daraus auch auf die Zusammensetzung der Flüssigkeit schließen kann. Man hat jedoch für solche Flüssigkeiten, welche in der Praxis häufig vorkommen, besondere Aräometer construirt, welche unmittelbar die Mischungsverhältnisse angeben; wir wollen hier nur eines der wichtigsten, nämlich das Alkoholometer, näher betrachten.

Das Alkoholometer dient dazu, um den Alkoholgehalt eines Weingeistes zu bestimmen.

Der Weingeist besteht bekanntlich aus einer Mischung von Wasser und Alkohol. Nun ist das specifische Gewicht des Alkohols gleich 0,793, wenn man das des Wassers als Einheit annimmt; eine Mischung von Wasser und Alkohol wird also ein specifisches Gewicht haben, welches zwischen 1 und 0,793 fällt und sich mehr der einen oder der anderen Gränze nähert, je nachdem die Mischung mehr Wasser oder mehr Alkohol enthält. Das specifische Gewicht der Mischung weicht jedoch von dem arithmetischen Mittel ab, welches man aus den Mischungsverhältnissen berechnet.

Der Grund dieser Abweichung liegt darin, daß, wenn man Wasser und Weingeist mischt, eine Contraction stattfindet, die wir erst durch einen Versuch anschaulich machen wollen.

Fig. 94.

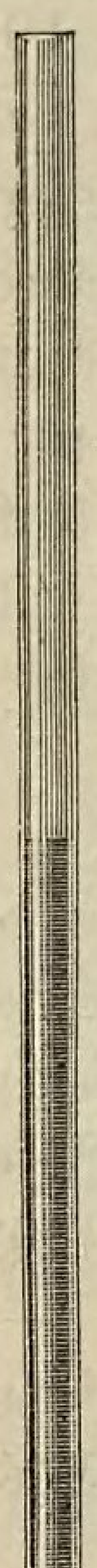
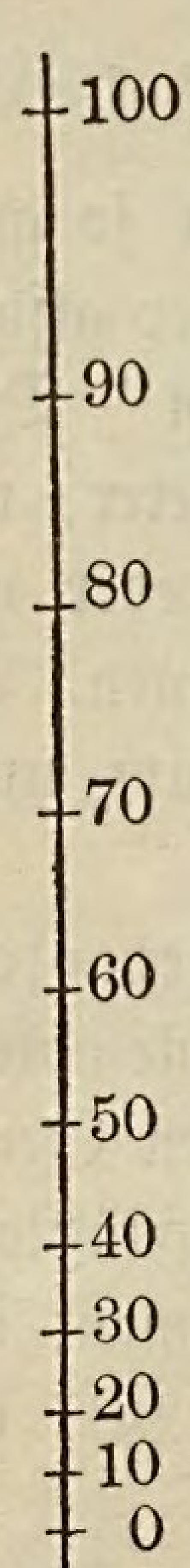


Fig. 95.



Man gieße eine Glasröhre, Fig 94 (etwa eine solche, wie man sie zum Toricelli'schen Versuche nimmt), halb voll Wasser und fülle die andere Hälfte mit möglichst starkem Weingeist (für Vorlesungen ist gefärbter Weingeist zu empfehlen), so werden sich die Flüssigkeiten nicht mischen; der Weingeist schwimmt auf dem Wasser. Nachdem das offene Ende durch einen Korkstöpsel fest verschlossen worden ist, so daß durchaus keine Flüssigkeit entweichen kann, kehrt man die Röhre um; es wird durch das Sinken des Wassers alsbald eine Mischung der Flüssigkeiten vor sich gehen. Hat nach mehrmaligem Umkehren die Mischung vollständig stattgefunden, so sieht man, daß die vorher ganz volle Röhre nicht mehr ganz angefüllt ist; es hat sich ein leerer Raum gebildet, der in einer 60 cm langen Röhre eine Länge von ungefähr 1 cm einnimmt.

Die Punkte, bis zu welchen ein Aräometer in Weingeist von verschiedenem Alkoholgehalt einsinken wird, lassen sich demnach nur durch Versuche ermitteln.

Bezeichnet man auf der Scala eines Aräometers diejenigen Punkte, bis zu welchen das Instrument in Weingeist einsinken wird, welcher 10, 20, 30, 40 ꝛc. Volumprocente Alkohol enthält, und theilt man die Zwischenräume in 10 gleiche Theile, so erhält man ein Procent-Aräometer für Weingeist, d. h.

ein Aräometer, an welchem man unmittelbar ablesen kann, wie viel Raumtheile Alkohol in 100 Raumtheilen Weingeist enthalten sind. Solche Alkoholometer wurden in Frankreich nach Gay-Lussac's, in Deutschland nach Tralles' Angaben ausgeführt, und es ist gesetzlich bestimmt, daß der Alkoholgehalt des der Besteuerung unterworfenen Branntweins, Weingeistes u. s. w. mit Hülfe dieses Instruments ermittelt werden soll. Beistehende Scala, Fig. 95, zeigt die Hauptabtheilungen eines solchen Alkoholometers in ihrem richtigen Verhältniß. Man sieht, wie sich erwarten ließ, daß die Abtheilungen ungleiche Größe haben.

Das Alkoholometer kann durch das Densimeter recht gut ersetzt werden, wenn man nur eine Tabelle zur Hand hat, welche den Alkoholgehalt angiebt, der den verschiedenen specifischen Gewichten entspricht.

Begreiflicher Weise kann man aber das Alkoholometer einzig und allein zu dem angegebenen Zwecke verwenden; für jede andere Flüssigkeit ist es völlig unbrauchbar. Auf ähnliche Weise, wie das Alkoholometer, hat man auch Aräometer construirt, welche den Gehalt einer verdünnten Säure, einer Salzlösung, einer Zuckerlösung u. s. w. angeben sollen.

Aeltere Aräometerscalen. Es bleiben jetzt nur noch die älteren Aräometerscalen zu erwähnen, welche jedoch keinen wissenschaftlichen Werth mehr haben. 45

Beaumé bestimmte außer dem Wasserpunkte noch einen zweiten fixen Punkt dadurch, daß er das Instrument in eine Lösung von 1 Gewichtstheil Kochsalz in 9 Gewichtstheilen Wasser tauchte. Den Raum zwischen diesen beiden Punkten theilte er in 10 gleiche Theile, die er Grade nannte; die Theilung ist auch noch jenseits der beiden fixen Punkte fortgesetzt. — Für Flüssigkeiten, welche schwerer sind als Wasser, ist der Wasserpunkt mit 0 bezeichnet, und die Grade werden nach unten gezählt. Für leichtere Flüssigkeiten ist der Wasserpunkt mit 10 bezeichnet, und die Grade werden nach oben gezählt. Man sieht wohl, daß man durch ein solches Instrument weder das specifische Gewicht, noch den Gehalt einer Flüssigkeit erfährt.

Cartier brachte an der Beaumé'schen Scala eine unwesentliche Veränderung an; er machte nämlich die Grade etwas größer, so daß 15 seiner Grade gleich 16 Beaumé'schen sind.

Viertes Capitel.

Molekularwirkungen

zwischen

festen und flüssigen Körpern, sowie zwischen den einzelnen Theilchen der Flüssigkeiten selbst.

---

46 **Adhäsion zwischen festen und flüssigen Körpern.** Zwischen festen und flüssigen Körpern finden ähnliche Adhäsionserscheinungen Statt, wie zwischen festen Körpern unter einander, d. h. die Flüssigkeiten haften mehr oder weniger stark an den Oberflächen fester Körper. Spritzt man z. B. einige Wassertropfen gegen eine vertical stehende Glasscheibe, so werden sie zum Theil daran hängen bleiben und nicht herunterlaufen, wie es der Fall sein würde, wenn der Schwerkraft der Tropfen nicht durch eine andere Kraft, nämlich durch die Anziehung, welche zwischen den Theilchen der Flüssigkeit und der Oberfläche der Glaswand stattfindet, das Gleichgewicht gehalten würde.

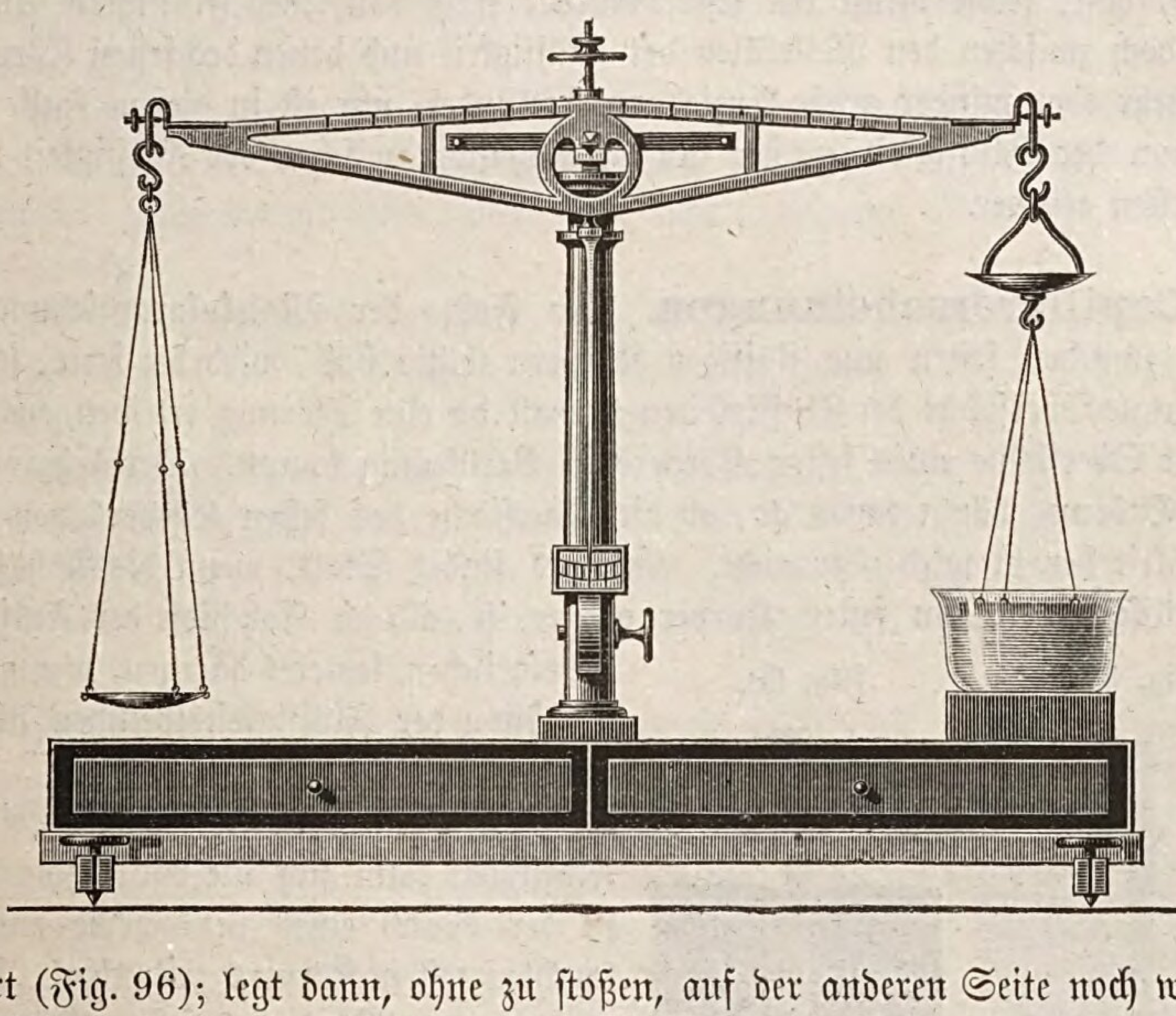
Diese Adhäsion ist auch die Ursache, daß Flüssigkeiten, die man ausgießen will, so leicht an der äußeren Wand des Gefäßes herablaufen. Um dies zu verhüten, bestreicht man den äußeren Rand der Gefäße mit Fett, oder man läßt die ausfließende Flüssigkeit an einem benetzten Glasstäbchen herablaufen.

47 **Cohäsion der Flüssigkeitstheilchen.** Wenn die Flüssigkeiten auch keine selbständige Gestalt haben, wenn sich auch die einzelnen Theilchen ungemein leicht an einander verschieben lassen, so hört deshalb doch noch nicht jeder Zusammenhang zwischen ihnen auf, wie dies schon aus der Tropfenbildung hervorgeht. Gießt man etwas Wasser auf eine mit Bärlappsamen (Semen lycopodii) bestäubte Fläche oder etwas Quecksilber auf einen Porzellanteller, so bilden sich fast kugelförmige Tröpfchen. Wenn gar kein Zusammenhang zwischen den einzelnen Theilchen des Wassers, oder denen des Quecksilbers bestände, so müßten die Theilchen gleichsam wie Staub ausein-

anderfallen; bei langsamem Ausgießen von Flüssigkeiten aus irgend einem Gefäße würden diese nicht in einzelnen Tropfen herabfallen; ein solcher Tropfen fällt erst, wenn sein Gewicht groß genug ist, um ein Abreißen von der übrigen Masse der Flüssigkeit zu bewirken.

Die Cohäsion, welche zwischen den einzelnen Theilchen einer Flüssigkeit stattfindet, läßt sich direct messen. Wenn eine feste Scheibe auf die Oberfläche einer Flüssigkeit gesetzt wird, so kann man sie in verticaler Richtung nicht mehr so leicht in die Höhe ziehen, wie wenn sie frei in der Luft hängt; es ist, um sie in die Höhe zu ziehen, eine mehr oder minder große Kraft nöthig. Um diese Kraft zu messen, bedient man sich der hydrostatischen Wage. Auf der einen Seite hängt man eine horizontale Scheibe an, auf der anderen Seite legt man ein Gegengewicht auf, welches ihr das Gleichgewicht hält. Wenn das Gleichgewicht hergestellt ist, nähert man der Scheibe von unten die Oberfläche einer Flüssigkeit, bis die Flüssigkeit die untere Fläche der Scheibe gerade be-

Fig. 96.



rührt (Fig. 96); legt dann, ohne zu stoßen, auf der anderen Seite noch weitere Gewichte auf, bis die Scheibe von der Flüssigkeit abreißt.

Um eine Glasscheibe von 118 mm Durchmesser abzureißen, sind für verschiedene Flüssigkeiten verschiedene Gewichte nöthig und zwar für

Wasser	59 g
Alkohol	31 „
Terpentinöl . .	34 „

Eine Scheibe von gleichem Durchmesser aus Kupfer oder irgend einer Substanz verfertigt, welche von der Flüssigkeit benetzt wird, giebt genau dieselben Resultate. Die zum Abreißen nöthige Kraft hängt also nicht von der

Natur des benetzten festen Körpers, sondern nur von der Natur der Flüssigkeit ab. Es ist leicht, den Grund davon einzusehen, denn beim Aufziehen bleibt immer eine Schicht Flüssigkeit an der Scheibe hängen; man hat also durch das Uebergewicht auf der anderen Seite nicht die Flüssigkeit von der festen Scheibe, sondern die Moleküle der Flüssigkeit von einander getrennt, somit die Cohäsion der Flüssigkeit überwunden. Die in Rede stehenden Versuche geben also ein Maaß für die Cohäsion, welche zwischen den Theilchen der Flüssigkeit stattfindet, und man sieht, daß diese Cohäsion ziemlich bedeutend ist und daß sie sich mit der Natur der Flüssigkeiten ändert.

Wenn die Oberfläche der Scheibe nicht von der Flüssigkeit benetzt wird, wie es z. B. der Fall ist, wenn man eine Glasscheibe auf Quecksilber setzt, so drückt das Zulagegewicht, welches das Abreißen bewirkt, nicht mehr die Cohäsion der Flüssigkeit aus.

Um eine Glasscheibe von den oben erwähnten Dimensionen von Quecksilber abzureißen, ist eine Kraft von ungefähr 200 g nöthig. Daraus geht hervor, daß, selbst wenn ein fester Körper nicht von einer Flüssigkeit benetzt wird, doch zwischen den Molekülen der Flüssigkeit und denen des festen Körpers eine mehr oder minder große Anziehung stattfindet; nur ist in diesem Falle die Cohäsion der Flüssigkeit größer als die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und dem festen Körper.

48 **Capillarerscheinungen.** In Folge der Molekularanziehungen, welche zwischen festen und flüssigen Körpern thätig sind, wird die freie, sonst horizontale Oberfläche der Flüssigkeiten überall da eine Störung erleiden, wo sie mit der Oberfläche eines festen Körpers in Berührung kommt. Der Charakter dieser Störung hängt davon ab, ob die Oberfläche des festen Körpers von der Flüssigkeit benetzt wird oder nicht. Ersteres findet Statt, wenn die Adhäsion der Flüssigkeit an den festen Körper größer ist, als die Cohäsion der Flüssigkeitstheilchen, letzteres dagegen, wenn die Cohäsion der Flüssigkeitstheilchen überwiegend ist.

Fig. 97.

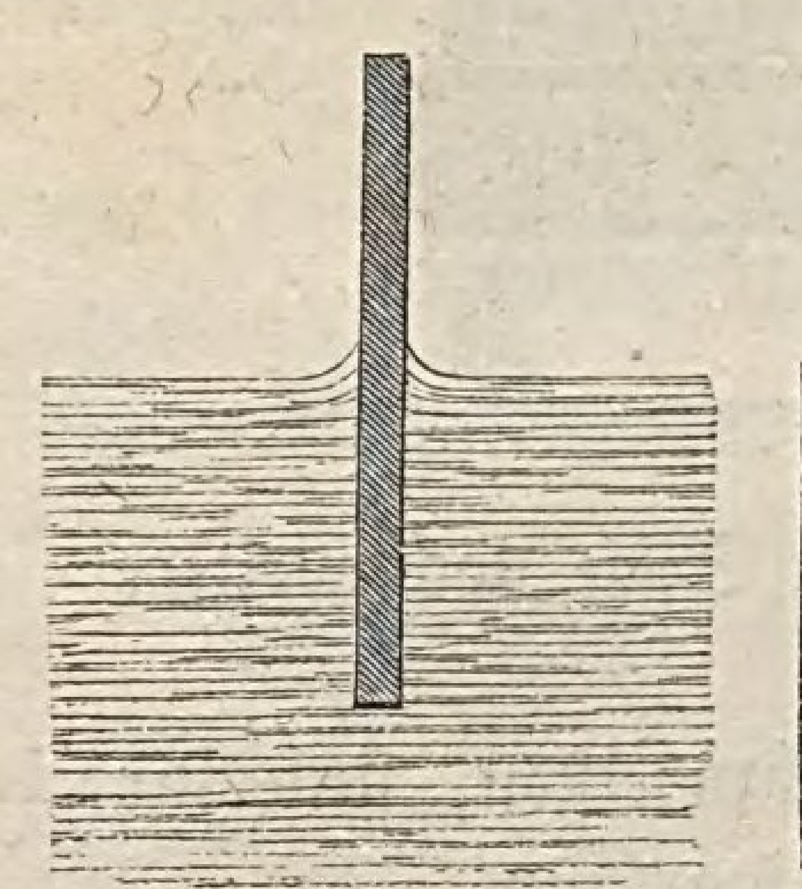
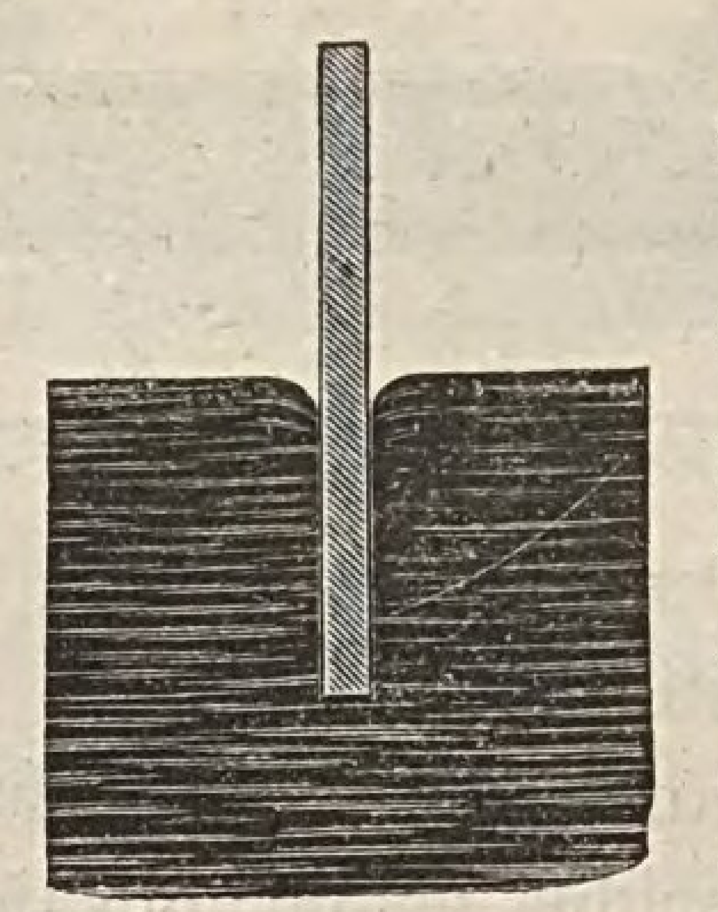


Fig. 98.



Die horizontale Oberfläche einer Flüssigkeit kann sich nie vollständig bis zu der Wand eines in dieselbe eingetauchten festen Körpers erstrecken. Sie wird an der Wand des festen Körpers aufsteigen, wie Fig. 97 zeigt, wenn die Adhäsion der Flüssigkeitstheilchen an den festen Körper größer ist als ihre Cohäsion; sie wird dagegen eine Depression erleiden, wie in Fig. 98, wenn die Cohäsion der Flüssigkeitstheilchen größer ist als ihre Adhäsion an den festen Körper.

Die Erscheinung Fig. 97 beobachtet man beim Eintauchen einer Glasplatte in Wasser, die in Fig. 98 abgebildete beim Eintauchen derselben in Quecksilber.

Aus gleichen Gründen kann sich die freie Oberfläche einer Flüssigkeit auch nie bis zu der Wand des Gefäßes erstrecken, in welchem sie sich befindet; sie wird in der Nähe der Wand entweder nach Oben oder nach Unten gekrümmt, je nachdem Benetzung stattfindet, oder nicht.

Taucht man eine Glasröhre in Wasser, so wird Innen und Außen an der Glaswand das Wasser aufsteigen; ist die Röhre weit genug, so bleibt der mittlere Theil der innerhalb der Röhre liegenden Wasseroberfläche ungestört wagerecht und von gleicher Höhe mit dem die Röhre umgebenden Wasserspiegel. Sobald aber die Röhre so eng wird, daß der Erhebungsbogen von der einen Seite mit dem gegenüberstehenden zusammentrifft, daß also die centrale Ebene verschwindet, so findet ein Aufsteigen des Wassers innerhalb der Röhre Statt, wie dies Fig. 99 andeutet.

Fig. 99.

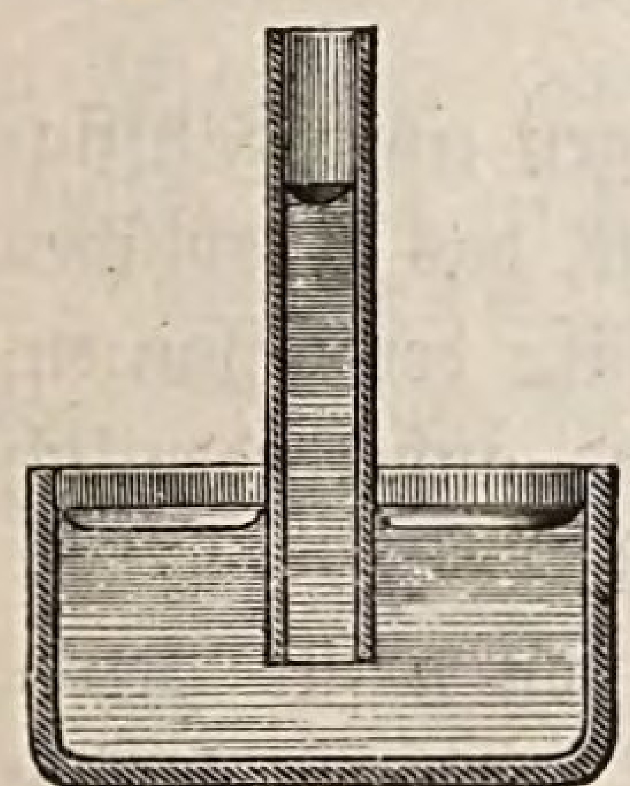
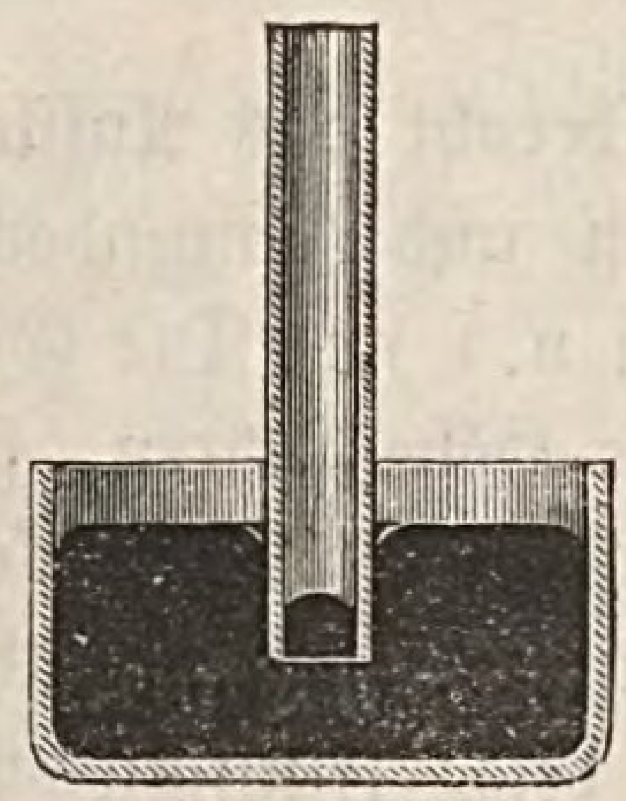


Fig. 100.



In gleicher Weise findet eine Depression der Flüssigkeit im Innern der Röhre Statt, wie Fig. 100 andeutet, wenn die eingetauchte Röhre von der Flüssigkeit nicht benetzt wird, wenn man also z. B. eine Glasröhre in Quecksilber taucht.

Röhrchen, welche so eng sind, daß in ihnen benetzende Flüssigkeiten zu einer namhaften Höhe aufsteigen, werden Haar- oder Capillarröhrchen genannt.

Diese Erscheinungen der Hebung und Senkung werden mit dem Namen der Capillarerscheinungen bezeichnet; die Kraft aber, welche sie hervorbringt, heißt Capillarattraction, oder auch bloß Capillarität. Diese Kraft wirkt überall, wo Flüssigkeiten mit festen Körpern in Berührung kommen.

Die Höhe, bis zu welcher eine benetzende Flüssigkeit in einem Haarröhrchen aufsteigt, ist unabhängig von der Wanddicke und der Substanz des Röhrchens, dagegen ist sie abhängig von der Natur der Flüssigkeit und umgekehrt proportional dem inneren Durchmesser des Röhrchens. Es ist also

$$h = \frac{n}{d},$$

wenn h die Höhe der gehobenen Flüssigkeitssäule, n einen von der Natur der Flüssigkeit abhängigen constanten Factor und d den Durchmesser des Röhrchens bezeichnet. Wenn d in Millimetern ausgedrückt ist, so ist der Werth von n für

Wasser	29,79	mm
Alkohol (specif. Gewicht 0,8135) . .	9,15	„
Terpentinöl	12,72	„
Schwefelkohlenstoff	10,00	„
Petroleum	13,40	„
Rüböl	12,00	„

Auf der Wirkung der Haarröhrchen beruht das Aufsteigen einer Flüssigkeit in Löschpapier, die Wirkung der Kerzen- und Lampendochte, das Ausblühen (Effloresciren) gesättigter Salzlösungen u. s. w. Die Gefäße der Pflanzen, welche den Saft aus den Wurzeln in die Höhe führen, sind außerordentlich fein und bewirken schon dadurch ein Aufsteigen der Flüssigkeit.

Aus vorstehender Tabelle ersieht man, daß der Werth von n für Petroleum und Rüböl nahezu der gleiche ist, beide Flüssigkeiten werden daher in Dochten nahezu auch gleich hoch steigen; dessenungeachtet kann man Rüböl in Petroleumlampen nicht brennen, weil die Flamme zu hoch über dem Spiegel der Flüssigkeit steht. Dies erklärt sich nur dadurch, daß das Petroleum rasch, das Oel aber nur langsam in den Höhlungen des Dochtes aufsteigt, wie aus folgendem Versuch hervorgeht. Ein Becherglas A, Fig. 101, wird bis zu

Fig. 101.

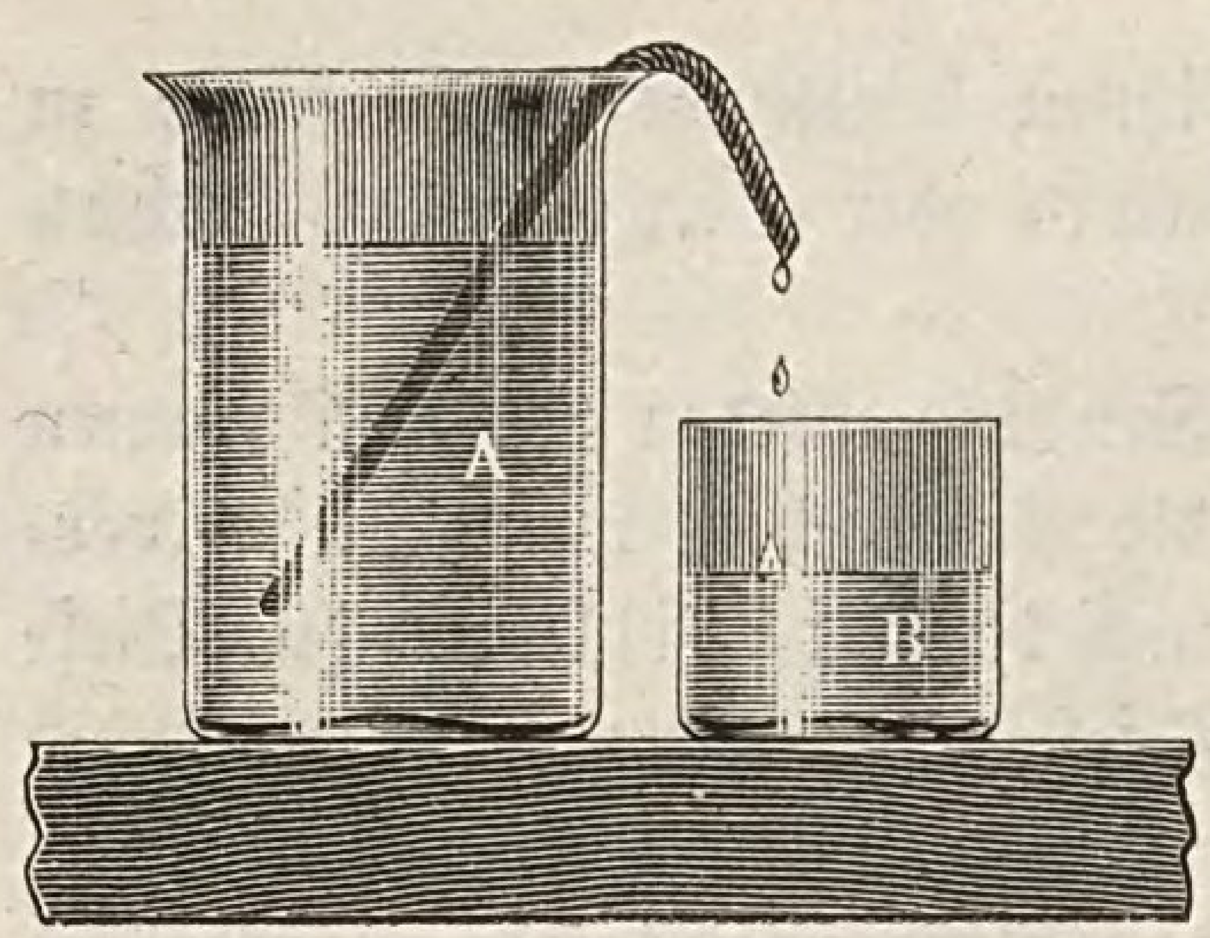
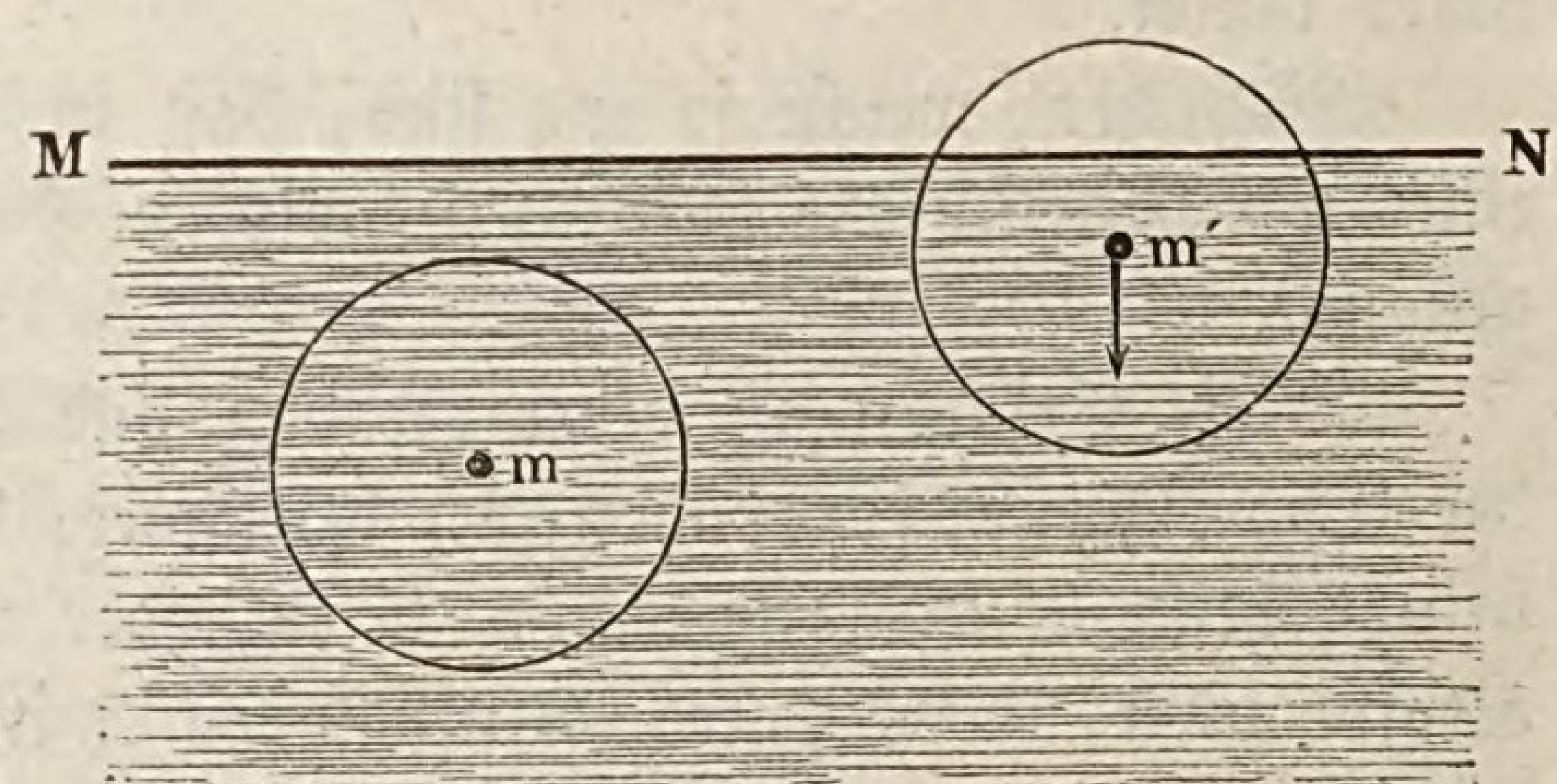


Fig. 102.



einer Höhe von 4 cm unter dem Rande mit Petroleum gefüllt, ein Lampendocht in die Flüssigkeit eingetaucht und über den Rand des Gefäßes A umgebogen, wie die Figur zeigt. Die aus A im Dochte aufgestiegene Flüssigkeit tropft nun in das Gefäß B herab. Bei einem derartigen Versuche ergab sich, daß in 4 mal 24 Stunden 160 ccm Petroleum übergegangen waren, während in gleicher Zeit nur 18 ccm Rüböl übergingen, wenn der Versuch ganz in gleicher Weise mit dieser Flüssigkeit angestellt wurde. Das Petroleum steigt also 9 mal schneller im Dochte auf als Rüböl.

Die Capillarerscheinungen finden ihre Erklärung durch den an der Oberfläche der Flüssigkeiten wirkenden sogenannten Normaldruck oder Oberflächendruck, den wir jetzt näher zu betrachten haben.

Die Moleküle einer jeden Flüssigkeit ziehen einander an, ihre Anziehungssphären aber sind unmeßbar klein. In Fig. 102 sei m ein Flüssigkeitsmolekül, dessen durch einen ausgezogenen Kreis dargestellte Anziehungssphäre ganz im

Innern der Flüssigkeit liegt. Nun ist klar, daß m nach allen Seiten hin gleich stark angezogen wird, daß es also keinem einseitigen Zug oder Druck ausgesetzt ist. Anders verhält es sich mit einem Flüssigkeitsmolekül m', dessen Abstand von der ebenen Oberfläche MN der Flüssigkeit kleiner ist als der Radius r seiner Anziehungssphäre. Da sich oberhalb des Moleküls m' weniger dasselbe anziehende Flüssigkeitstheilchen befinden als unterhalb, so ist die Resultirende sämmtlicher Molekularanziehungen, welchen m' ausgesetzt ist, eine rechtwinklig zu MN gegen das Innere der Flüssigkeit gerichtete Kraft, wie dies durch den kleinen Pfeil angedeutet werden soll. Dieser einseitige Druck, welcher als Normaldruck bezeichnet wird und welcher für die in der Oberfläche MN liegenden Moleküle ein Maximum ist, wirkt auf alle Theilchen der dicht unter der Oberfläche liegenden Flüssigkeitsschicht bis zur Tiefe r.

Die Größe des Normaldrucks wird eine andere, wenn die Oberfläche der Flüssigkeit nicht eben, sondern wenn sie gekrümmt, und zwar ist der Normaldruck für eine convexe Oberfläche $M'N'$ (Fig. 103) stärker und für eine

Fig. 103.

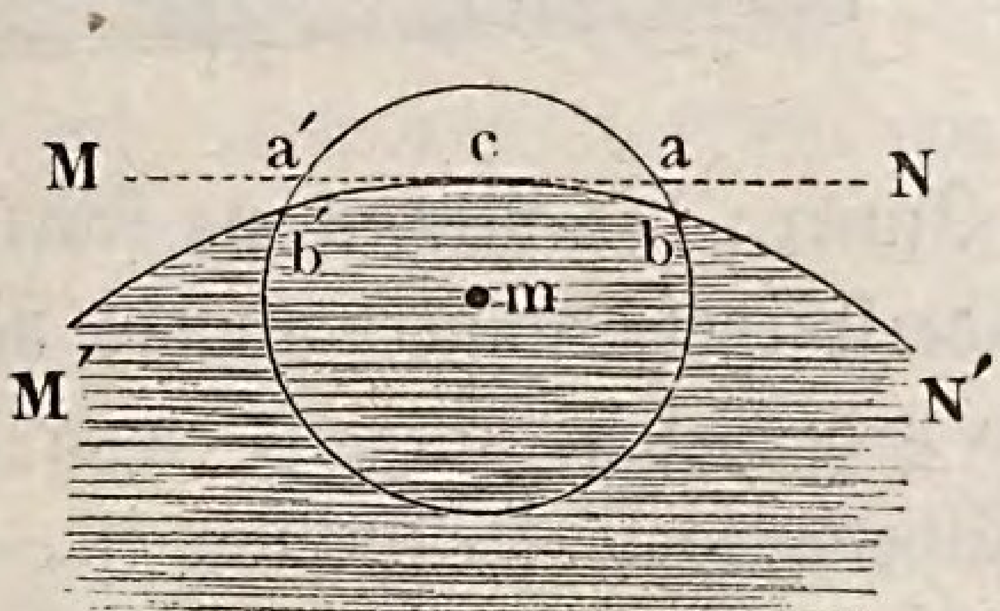
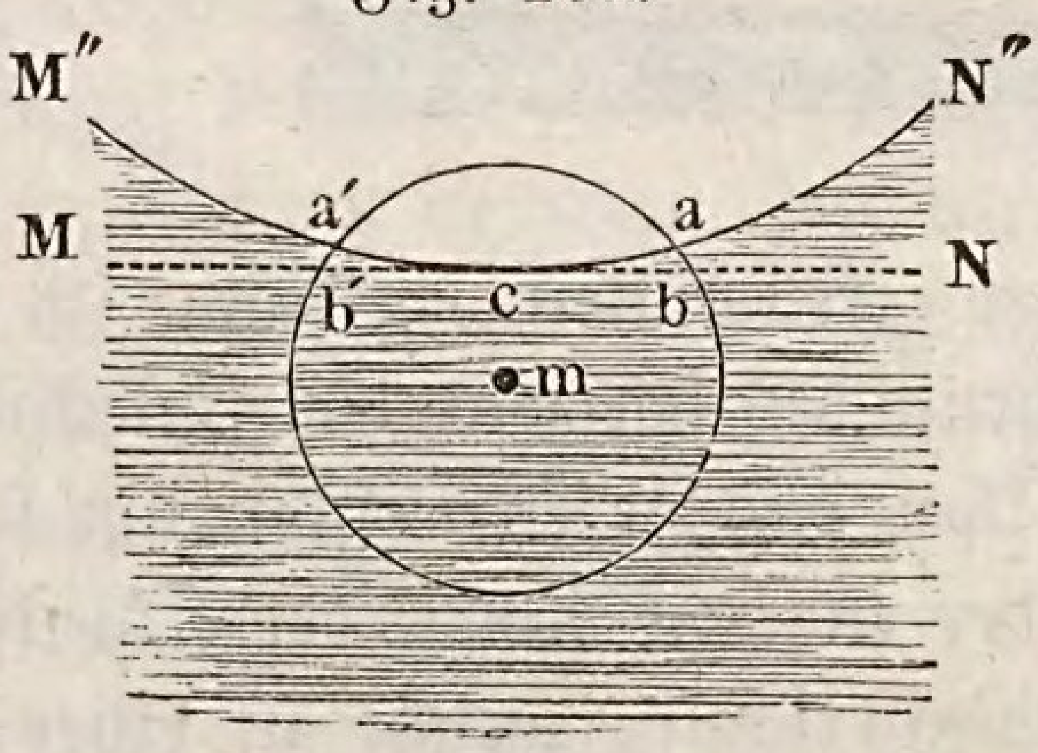


Fig. 104.



concave $M''N''$ (Fig. 104) schwächer als für die ebene Oberfläche MN, wie sich aus dem Anblick der Figuren ohne weitere Erläuterung ergiebt. Auch ist klar, daß der Normaldruck eine um so größere Zunahme, oder Abnahme erfährt, je mehr der convexe, oder der concave Flüssigkeitsspiegel gekrümmt, also je kleiner dessen Krümmungshalbmesser ist. Bezeichnen wir daher den Normaldruck für eine ebene Oberfläche mit K, so kann der Normaldruck P für eine convexe Oberfläche

$$P = K + \frac{H}{R}$$

gesetzt werden, wenn R den Krümmungshalbmesser der convexen Fläche bezeichnet und H ein von der Natur der Flüssigkeit abhängiger constanter Factor ist. Für eine concave Oberfläche haben wir dagegen

$$P = K - \frac{H}{R}.$$

Daß die äußeren Moleküle einer convexen Flüssigkeitsoberfläche gleichsam ein die innere Masse kräftig zusammendrückendes Netzwerk bilden, läßt sich sehr gut an einer Seifenblase zeigen. Hält man die obere Mündung des Röhrchens, an welchem sie angeblasen wurde, mit dem Finger zu, so behält sie ihre Größe unverändert bei; sobald man aber den Finger von der Mündung ent-

fernt, verkleinert sich die Seifenblase anfangs langsam, dann schneller und schneller, bis sie sich endlich ganz in das Röhrchen zurückzieht. Es ist dies die Folge des Normaldrucks der gekrümmten Wasseroberfläche, durch welchen die Luft im Innern der Seifenblase comprimirt wird.

Bringt man einen Tropfen Quecksilber in ein vollkommen cylindrisches horizontal liegendes Glasröhrchen, so bildet er einen an beiden Enden abgerundeten Cylinder. Es kann aber durchaus keine Bewegung entstehen, weil die Convexität an beiden Enden gleich ist.

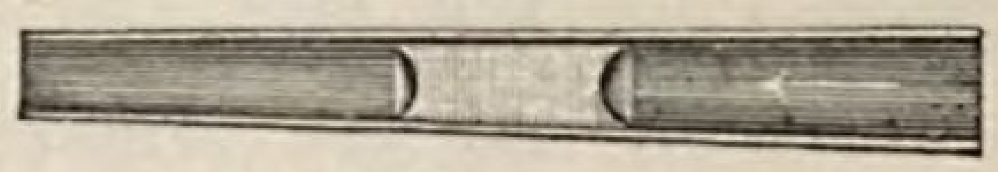
Ist aber das Röhrchen konisch, Fig. 105, so ist der Quecksilberfaden am engeren Ende am meisten gekrümmt; hier ist deshalb auch der Normaldruck stärker als auf der anderen Seite, und die Folge davon ist, daß sich der Quecksilberfaden nach dem weiteren Ende hin bewegt.

Taucht man ein Glasröhrchen vertical in Quecksilber, wie Fig. 100, S. 91 darstellt, so wird es sich im Röhrchen tiefer stellen als außen, weil der Normaldruck der stark gekrümmten Oberfläche im Innern des Röhrchens stärker ist als der Normaldruck des horizontalen Quecksilberspiegels außerhalb des Röhrchens. Es ist auch klar, daß die Depression um so größer sein muß, je enger die Röhre ist, weil in der engeren Röhre der Quecksilberspiegel gekrümmter ist.

Fig. 105.



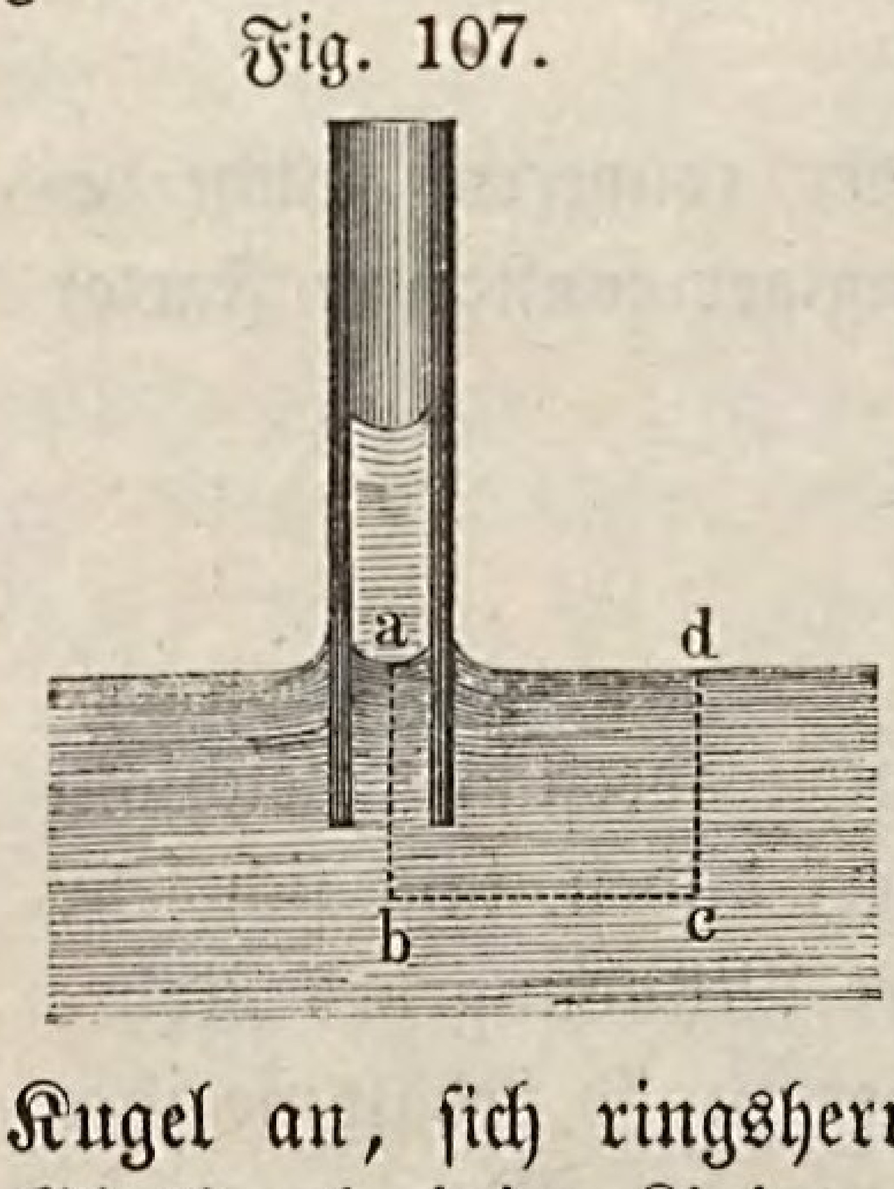
Fig. 106.



Eine Wassersäule, welche in einer hinreichend engen Glasröhre eingeschlossen ist, muß, wie wir gesehen haben, mit einer concaven Oberfläche endigen; der gegen das Innere der Flüssigkeit gerichtete Normaldruck wird aber um so schwächer, je stärker die Krümmung der Oberfläche ist.

Ein Tropfen Wasser in einer horizontalen cylindrischen Glasröhre wird einen an beiden Enden concaven Cylinder bilden, der sich nicht bewegt, weil die Concavitäten an beiden Enden gleich sind. Ist das Röhrchen konisch, Fig. 106, so ist natürlich die eine Concavität stärker gekrümmt als die andere, und durch den überwiegenden Normaldruck auf der Seite der weniger gekrümmten Concavität wird das Wasser gegen das engere Ende der Röhre hingetrieben. Wird ein enges Glasröhrchen in verticaler Richtung in Wasser eingetaucht, wie Fig. 107, so wird sich zunächst bei *a* ein concaver Meniskus bilden; da aber hier der abwärts gerichtete Normaldruck geringer ist als an irgend einer Stelle *d* des äußeren horizontalen Wasserspiegels, so muß das Wasser im Innern des Röhrchens um eine der Druckdifferenz entsprechende Höhe steigen.

Fig. 107.



Schwimmt eine hohle gläserne Kugel auf Wasser, so fängt dieses schon in einiger Entfernung von der Kugel an, sich ringsherum gegen dieselbe zu heben. Bringt man eine zweite Glaskugel einige Linien weit von der ersten in das Wasser, so nähern sich die

Kugeln anfangs langsam, dann schneller und schneller, bis sie endlich an einander stoßen. Wären beide Kugeln fest, so würde in Folge der Capillaranziehung das Wasser zwischen ihnen gestiegen sein; da sie aber beweglich sind, so muß die an sie gleichsam angeheftete und durch ihre Schwere sinkende Wasser-

Fig. 108.

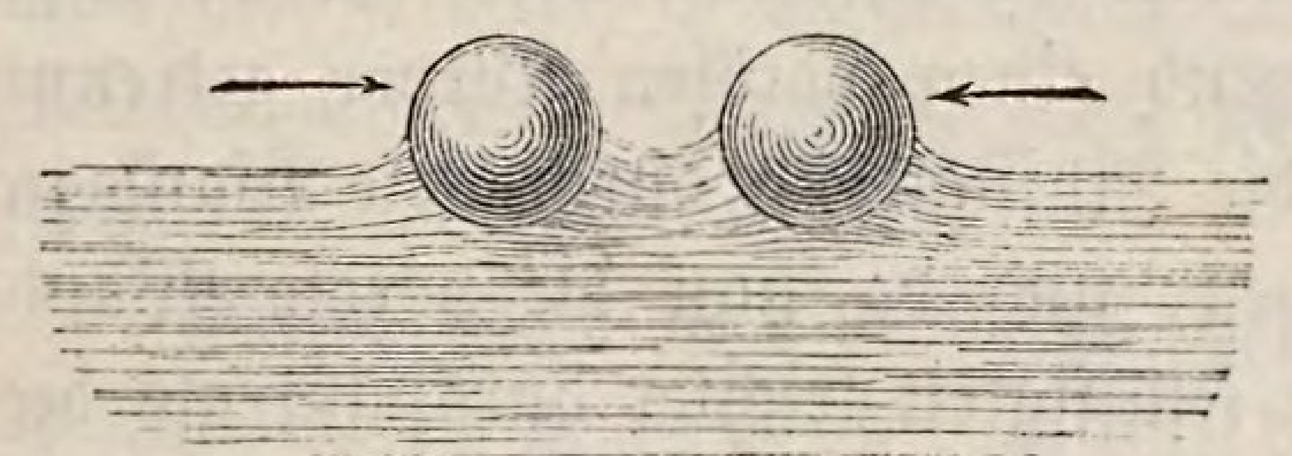
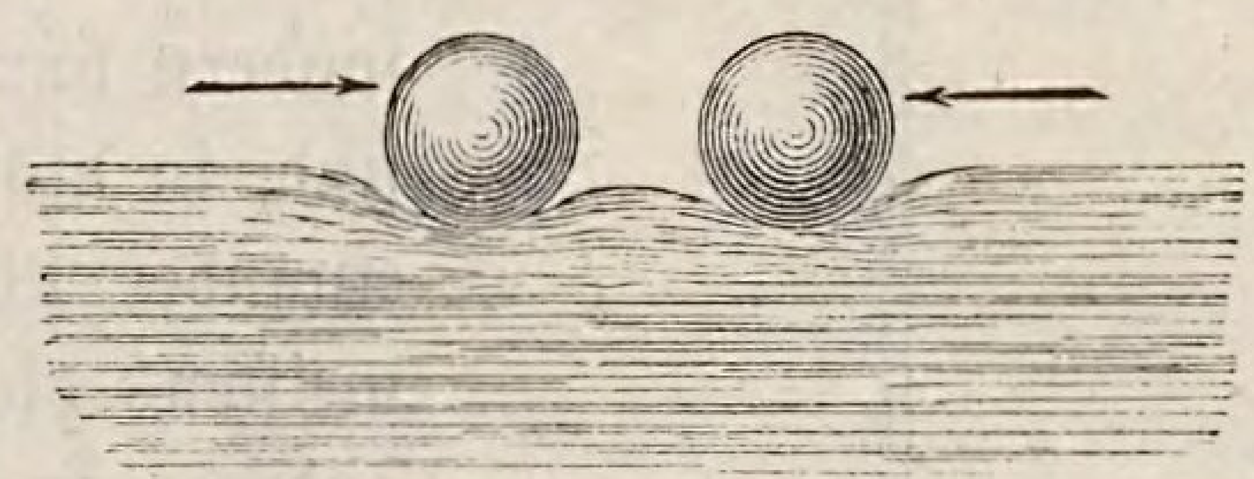


Fig. 109.



fläche, welche sich zwischen ihnen befindet, die Kugeln gegen einander ziehen. Zwei auf Quecksilber gelegte Glaskugeln, Fig. 109, werden gleichfalls gegeneinander getrieben, weil der Quecksilberspiegel zwischen den Kugeln niedergedrückt ist.

Elasticität der Flüssigkeiten. Auch die tropfbar flüssigen 49
Körper sind in gewisser Beziehung elastisch; denn sie lassen sich durch einen sehr starken Druck, wenn auch nur sehr wenig, auf ein kleineres Volumen zusammenpressen, und wenn der Druck nachläßt, nehmen sie ihr ursprüngliches Volumen wieder ein. Zuerst hat Oersted, später haben Colladon und Sturm Versuche über die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten angestellt. Diese Versuche haben ergeben, daß durch einen Druck von 1 kg auf eine Fläche von 1 qcm das Quecksilber ungefähr um 3, das Wasser dagegen um 48 Milliontheile seines Volums zusammengepreßt wird.

Die Endosmose. Wenn man Wasser und Oel in einer Flasche 50
zusammenschüttelt, so werden sich, der Ruhe überlassen, die beiden Flüssigkeiten doch alsbald wieder trennen, und nach ihrem specifischen Gewichte über einander lagern. Es rührt dies unstreitig daher, daß die Anziehung zwischen zwei Wassermolekülen ebenso wie die Anziehung zwischen zwei Oelmolekülen größer ist als die Anziehung zwischen einem Wassermolekül und einem Oelmolekül.

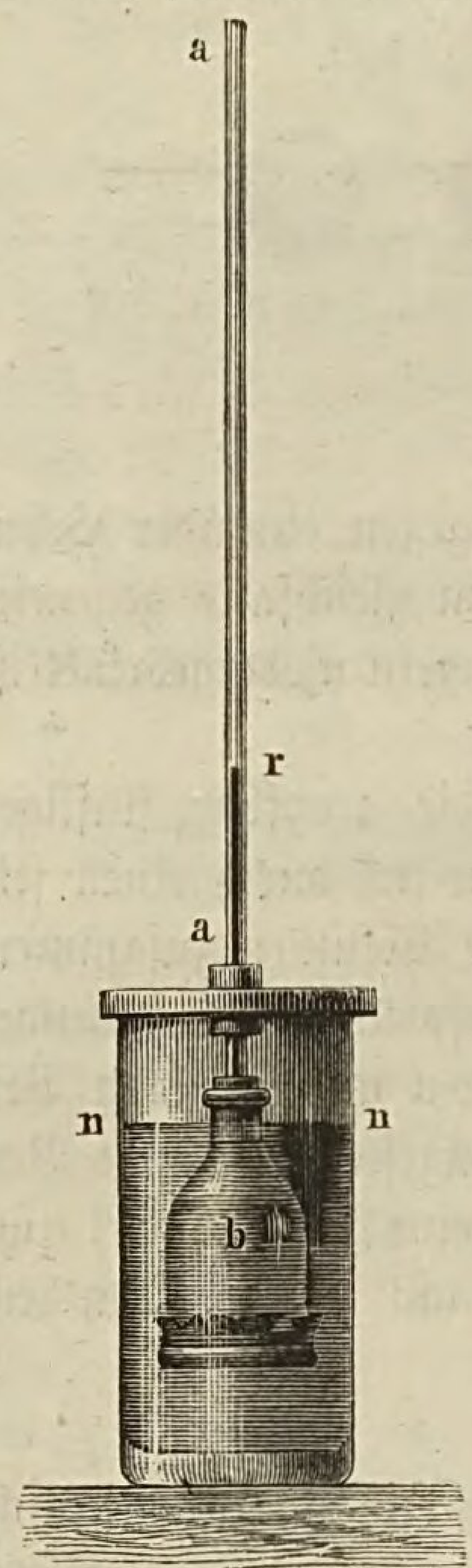
Ganz anders verhalten sich Weingeist und Wasser. Die Anziehung zwischen einem Weingeist- und einem Wassermolekül ist größer als die Kraft, mit welcher sich zwei Wassermoleküle oder zwei Weingeistmoleküle einander anziehen. Darum läßt sich auch aus Wasser und Weingeist eine Mischung herstellen, in welcher jede der beiden Flüssigkeiten vollkommen gleichförmig verbreitet ist. Ja selbst wenn die beiden Flüssigkeiten anfänglich nach ihrem specifischen Gewichte geschichtet sind, d. h. wenn der Weingeist anfänglich auf dem Wasser schwimmt, so wird durch die erwähnte stärkere Anziehung zwischen Wasser und Weingeist nach einiger Zeit doch eine gleichförmige Mischung der beiden Flüssigkeiten erfolgen. Ganz ähnlich verhalten sich Wasser und Schwefelsäure, Wasser und eine concentrirte Salzlösung u. s. w.

Diese Erscheinung der nach und nach von selbst eintretenden gleichförmigen Mischung zweier verschiedener Flüssigkeiten bezeichnet man mit dem Namen der

Diffusion. Wasser und Weingeist diffundiren in einander, während zwischen Wasser und Oel keine Diffusion stattfindet.

Wenn nun zwei Flüssigkeiten, welche sich in der erwähnten Weise zu mischen, gleichsam gegenseitig zu durchdringen suchen, wie Wasser und Weingeist, Wasser und Schwefelsäure u. s. w., nicht in unmittelbarer Berührung, sondern durch irgend einen porösen Körper getrennt sind, so müssen die Flüssigkeiten durch diese Wand zu einander übergehen, und da nun die poröse Wand meistens die eine Flüssigkeit leichter durchläßt als die andere, so muß die Menge der Flüssigkeit auf der einen oder der anderen Seite zunehmen. Füllt man z. B. eine unten mit einer Blase zugebundene Glasröhre zum Theil mit concentrirter Kupfervitriollösung, und taucht man dann die durch die Blase verschlossene Oeffnung in ein Gefäß mit Wasser, so findet eine doppelte Strömung durch die Blase hindurch Statt, nämlich eine stärkere von dem Wasser zur Kupfervitriollösung, in Folge welcher die Flüssigkeit in der Röhre allmälig steigt, und eine schwächere von der Kupfervitriollösung zum Wasser, welches in Folge davon sich nach und nach blau färbt.

Fig. 110.



Aehnliche Erscheinungen beobachtet man, wenn man in die Röhre Alkohol gießt und sie in Wasser taucht. Nach einiger Zeit sieht man, daß das Niveau der Flüssigkeit in der Röhre gestiegen ist.

Man nennt diesen Austausch von Flüssigkeiten durch eine poröse Scheidewand hindurch Endosmose, oder richtiger Diosmose.

Um die Zunahme des Volumens auf der einen Seite recht auffallend zu machen, dient der Fig. 110 dargestellte Apparat, welcher Endosmometer genannt wird; *a* ist eine Glasröhre, deren innerer Durchmesser 1 bis 2 mm beträgt und die durch einen sehr wohlschließenden Kork in dem Halse eines weiteren Glasgefäßes *b* befestigt ist. Das Gefäß *b* ist unten durch eine Thierblase verschlossen. Dieser mit der einen Flüssigkeit gefüllte Apparat wird nun in ein weiteres Gefäß, welches die andere Flüssigkeit enthält, eingesetzt, ohne daß jedoch die Blase auf dem Boden des äußeren Gefäßes aufsitzt.

Das Gefäß *b* sammt der Röhre *a* sei z. B. mit Weingeist gefüllt, das untere Gefäß enthalte Wasser. Sobald das Gefäß *b* eingesetzt ist, wird sich alsbald ein mechanisches Gleichgewicht zwischen der inneren und äußeren Flüssigkeit und der Spannung der Blase herstellen. Es sei bei *n* das Niveau des Wassers, bei *r* der Gipfel der Weingeistsäule in der Röhre. Nach einer Viertelstunde schon beobachtet man eine bedeutende Veränderung; die Flüssigkeit ist nämlich um einige Millimeter über *r* hinaus gestiegen, und dieses Steigen

dauert fort. Wenn die Röhre selbst 4 bis 5 dm hoch ist, so hat doch die Flüssigkeit nach einigen Stunden den Gipfel erreicht und fließt dann oben aus. Bei diesem Versuch geht der stärkere Strom vom Wasser zum Alkohol ungeachtet des Druckes, welchen dieser in Folge der Schwere gegen die Blase ausübt, während der schwächere Strom vom Alkohol zum Wasser gerichtet ist. Macht man den Versuch in umgekehrter Ordnung, indem man das Wasser innen, den Alkohol außen hinbringt, so sinkt das Niveau in der Röhre, während es außen steigt.

Wenn man in ein Gefäß von ungebranntem Thon (etwa eine poröse Thonzelle, wie sie zu Grove's und Bunsen's galvanischen Batterien gebraucht werden) Schwefelsäure gießt und es dann in ein anderes Gefäß mit Wasser stellt, so sickern beide Flüssigkeiten durch die Thonzelle hindurch; die stärkere Strömung erfolgt vom Wasser zur Schwefelsäure, die schwächere von der Schwefelsäure zum Wasser; in Folge davon steigt der Flüssigkeitsspiegel im Innern der Thonzelle, während er außen sinkt.

Die Wirkung der Endosmose dauert fort, wenn auch allmälig immer schwächer, bis die Flüssigkeiten zu beiden Seiten der Scheidewand ganz gleichartig sind.

Daß der Spiegel der Flüssigkeit auf der einen Seite so hoch über den auf der anderen Seite steigen kann, rührt daher, daß die Poren der Scheidewand zu fein sind, als daß ein hydrostatischer Druck sich durch dieselben fortpflanzen könnte. Denn wenn man Wasser in eine poröse Thonzelle gießt, so werden die Wände zwar feucht, aber das Wasser tropft nicht durch, und eine Thierblase, welche gleichfalls vom Wasser befeuchtet wird, kann nicht zum Filtriren des Wassers gebraucht werden.

Welche der getrennten Flüssigkeiten an Volumen zunimmt, hängt lediglich von der Natur der trennenden Scheidewand ab; wenn Wasser und Weingeist durch eine Kautschukplatte getrennt sind, so nimmt das Wasser an Volumen zu, indem der Weingeist leichter durch den Kautschuk dringt als Wasser.

Wird eine zu endosmotischen Versuchen brauchbare Scheidewand in eine Flüssigkeit getaucht, so wird sie, je nach der Molekularanziehung, welche zwischen der Membran und der Flüssigkeit besteht, eine größere oder kleinere Menge der Flüssigkeit resorbiren und zurückhalten.

Ueber die Resorption von Flüssigkeiten durch thierische Blasen hat Liebig Versuche angestellt, welche den Vorgang bei den endosmotischen Erscheinungen sehr schön erläutern.

100 Gewichtstheile trockene Ochsenblase nehmen in 24 Stunden auf:

268	Gewichtstheile	Wasser,
133	„	Kochsalzlösung (1,204 specif. Gewicht),
38	„	Weingeist (84 Proc.),
17	„	Knochenöl.

Das Absorptionsvermögen der thierischen Membranen für verschiedenartige Flüssigkeiten ist also sehr ungleich. In Wasser gelegt, quillt die Blase auf und wird weich, in Alkohol bleibt sie hart.

Wenn eine Blase, welche irgend eine Flüssigkeit resorbirt hat, mit einer Substanz in Berührung gebracht wird, welche gleichfalls eine Anziehung auf die Theilchen der resorbirten Flüssigkeit äußert, so wird ein Theil dieser Flüssigkeit der Blase entzogen.

Bestreut man z. B. eine mit Wasser gesättigte Blase mit Kochsalz, so entsteht überall da, wo das Salz mit dem Wasser, welches die offenen Poren erfüllt, in Berührung kommt, eine gesättigte Salzlösung. Da aber die Resorptionsfähigkeit der Blase für die Salzlösung geringer ist als für reines Wasser, so tritt ein Theil der Flüssigkeit aus und fließt in Tropfen ab; dabei schrumpft die Blase zusammen.

Wird ein Stück mit Wasser gesättigter Blase in Alkohol gelegt, so verliert es in 24 Stunden ungefähr die Hälfte seines Gewichtes, was von einem Zusammenschrumpfen und Hartwerden der Blase begleitet ist.

Diese Thatsachen erläutern nun den Vorgang der Endosmose ganz vortrefflich.

Wenn eine Membran zur Trennung zweier Flüssigkeiten dient, so wird sie von jedem der getrennten Stoffe eine gewisse Quantität, je nach der Größe der Molekularanziehung, in sich aufnehmen; die resorbirte Flüssigkeit wird aber nach der anderen Seite der Blase wieder austreten, weil sie von dort her durch eine chemische Anziehung den Poren der Blase entzogen wird. Dieser Proceß wird fortdauern, bis die auf beiden Seiten befindlichen Flüssigkeiten einander gleich geworden sind.

Die Diosmose erklärt mehrere Erscheinungen, welche wir im täglichen Leben wahrnehmen.

Wenn man einen Rettig in Scheiben schneidet und dieselben mit Salz bestreut, so sind sie in kurzer Zeit ganz mit Wasser bedeckt. Hier zieht das Salz das Wasser aus den Zellen der Rettigscheiben heraus.

Trockene Erbsen und Bohnen quellen in Wasser gelegt stark auf, weil das Wasser in Folge eines diosmotischen Processes durch die Hülle in das Innere derselben eindringt.

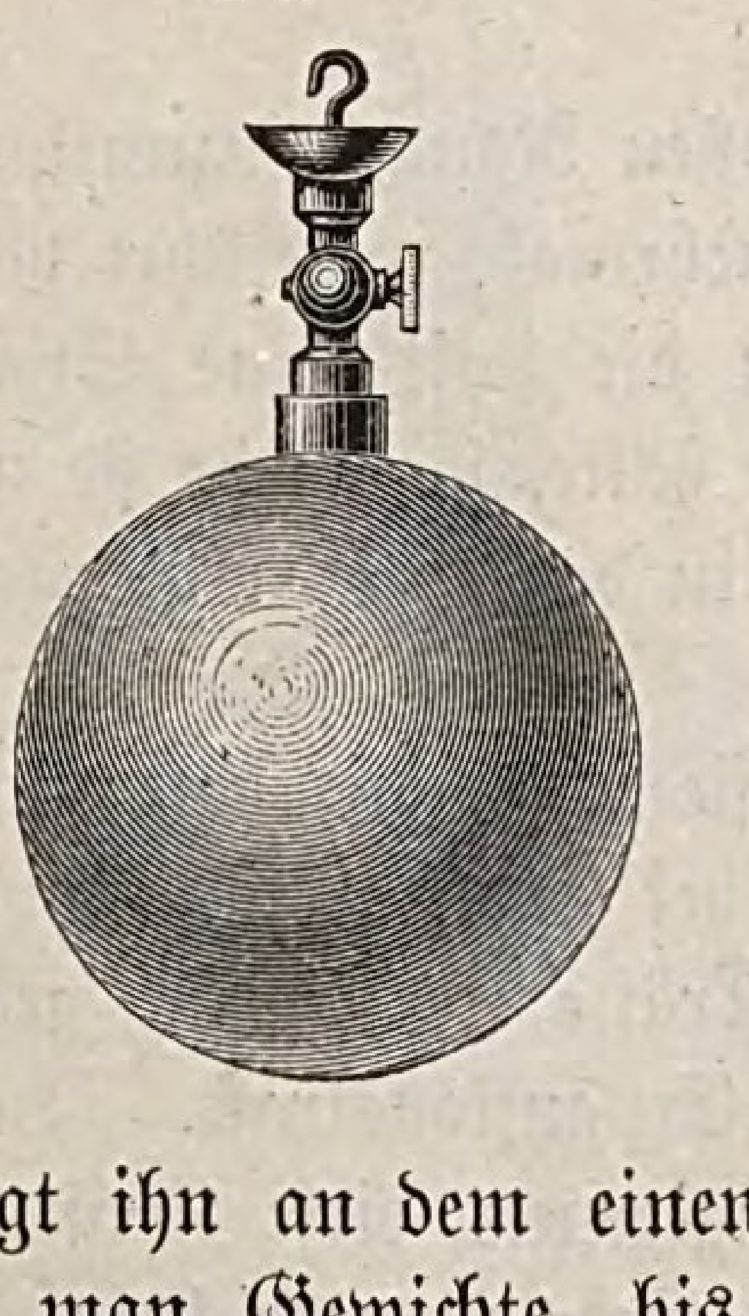
Fünftes Capitel.

Aërostatik oder die Lehre vom Gleichgewicht der Gase.

Schwere der Luft. Die Luft umgiebt unseren ganzen Erdball und 51
füllt auf dessen Oberfläche alle Räume aus, welche nicht von festen oder flüssigen Körpern eingenommen werden. Da wir mitten in der Luft leben, so erscheint sie uns nicht in der Form begränzter Massen, wie dies bei festen und flüssigen Körpern der Fall ist; auch können wir die Luft nicht sehen wie feste und flüssige Körper. Gleichwohl giebt es zahlreiche Erscheinungen, durch welche die Existenz der Luft bemerklich wird: wir fühlen den Wind, der uns entgegenstürmt und sehen den Staub, den er aufjagt.

Die Luft, welche unsere Erdatmosphäre bildet, ist ein Gemenge zweier einfacher Luftarten (Gase), des Stickstoffs und des Sauerstoffs. Außer diesen beiden giebt es noch manche andere Gase, deren besondere Eigenschaften in der Chemie betrachtet werden. So verschieden aber auch die chemischen Eigenschaften der Gase sein mögen, so stimmen sie doch in ihren physikalischen Eigenschaften im Wesentlichen mit denen der atmosphärischen Luft überein, die wir nun einer näheren Untersuchung unterwerfen wollen.

Fig. 111.



Schon sehr früh, ja selbst schon vor Aristoteles, vermuthete man, daß die Luft schwer sei. Diese Wahrheit wurde jedoch erst 1640 durch Galiläi bewiesen und etwas später durch Toricelli's schöne Versuche bestätigt. Durch folgenden Versuch läßt sich die Schwere der Luft direct nachweisen: Man macht einen Ballon, Fig 111, welcher mit einem Hahn versehen ist, mittelst der Luftpumpe luftleer und hängt ihn an dem einen Ende eines Wagebalkens auf; auf die andere Seite legt man Gewichte, bis das Gleichgewicht hergestellt ist. Man öffnet dann den Hahn, worauf sich der Ballon wieder mit Luft füllt. Dabei wird das

Gleichgewicht gestört, und die Wage neigt sich nach der Seite des Ballons hin. Auf der anderen Seite der Wage muß man von Neuem Gewichte auflegen, um das Gleichgewicht wieder herzustellen, und zwar gerade soviel, als die in den Ballon eingedrungene Luft wiegt. Für einen Ballon von 1 l Inhalt beträgt die Differenz der Gewichte etwas mehr als 1 g, woraus als erste Annäherung folgt, daß 1 l Luft unter gewöhnlichen Umständen etwas mehr als 1 g wiegt, d. h. daß das Wasser nicht ganz 1000mal so schwer ist als gewöhnliche Luft.

52 **Expansionskraft der Luft.** Es ist bereits in der Einleitung erwähnt worden, daß die luftförmigen Körper stets ein Bestreben zeigen, sich möglichst auszudehnen. Daß der Luft wirklich diese Eigenschaft zukommt, läßt sich durch folgenden Versuch darthun:

Man legt unter die Glocke der Luftpumpe eine nur wenig Luft enthaltende und deshalb runzelige Thierblase, deren Oeffnung fest zugebunden ist. Nach einigen Kolbenzügen schon bläht sich die Blase auf und ist endlich gerade so straff angespannt, als ob man mit Gewalt Luft hineingeblasen hätte. Läßt man die Luft wieder in den Recipienten hineintreten, so schrumpft die Blase wieder zusammen. Die in der Blase eingeschlossene Luft hat also wirklich ein Bestreben, sich auszudehnen; nur wird demselben durch die umgebende Luft Widerstand geleistet. Dieser Druck, welchen die Luft gegen die Wände der sie einschließenden Gefäße ausübt, wird ihre Tension, ihre Expansionskraft oder auch ihre Spannkraft genannt.

Eine Spiralfeder zeigt nur dann ein Bestreben, sich auszudehnen, wenn man sie vorher zusammengedrückt hat; sie verliert ihre Spannung, sobald sie in ihren ursprünglichen Zustand zurückgekehrt ist. Die Luft hat aber immer eine Expansionskraft, es giebt für sie kein ursprüngliches Volumen, weil sie immer einen größeren Raum einzunehmen strebt. Brächte man ein Liter gewöhnlicher Luft in einen leeren Raum von mehreren Cubikmetern, so würde sie sich in dem ganzen Raume gleichförmig verbreiten; dessen ungeachtet würde sie aber immer noch ein Bestreben haben, sich weiter auszudehnen, und würde also auch noch einen Druck auf die Wände ausüben.

Auf dem Bestreben der Luft, einen möglichst großen Raum einzunehmen, beruht die Einrichtung der Luftpumpe, die wir schon mehrmals angeführt haben und die alsbald näher beschrieben werden soll. Wenn die Luft keine Spannkraft, keine Elasticität in dem eben besprochenen Sinne hätte, so würde sie nicht aus dem Recipienten der Luftpumpe ausströmen und in den Stiefel übergehen können.

Aus der Expansionskraft der Gase folgt, daß sie nicht mit einer freien scharf begränzten Oberfläche enden können, wie dies bei den Flüssigkeiten der Fall ist. Auf die Luft der Atmosphäre wirken zwei Kräfte, welche sich gegenseitig das Gleichgewicht halten, die Schwere und die Expansionskraft. Durch die Schwere werden die Lufttheilchen nach der Erde angezogen; diese Kraft also äußert ein Bestreben, die Luft auf der Oberfläche der Erde zu verdichten, und diesem Bestreben wirkt die Expansionskraft entgegen. Die Dichtigkeit der

Luft muß mit der Erhebung über die Erdoberfläche allmälig abnehmen, um an ihrer oberen Gränze verschwindend klein zu werden.

Druck der Luft. Setzt man auf den Teller der Luftpumpe einen 53
Glas- oder Metallcylinder mit etwas dicken Wänden, welcher oben mit einer über den Rand gespannten und festgebundenen Thierblase verschlossen ist, so erleidet vorerst die Blase von beiden Seiten gleichen Druck und bildet deshalb eine Ebene. Wenn man nun auf irgend eine Weise mehr Luft in den Cylinder hineinbliese, so würde sich die Blase nach außen wölben; zieht man umgekehrt die Luft aus dem Cylinder heraus, so gewinnt der äußere Luftdruck das Uebergewicht und drückt die Blase nach innen. Letzteres läßt sich leicht mit Hülfe der Luftpumpe bewerkstelligen. Bei den ersten Kolbenzügen schon wird die Blase nach innen gekrümmt, Fig. 112; je mehr man auspumpt, desto mehr nimmt die Krümmung zu, bis die Blase endlich in Stücke reißt, wobei man einen Knall wie einen Pistolenschuß hört. Dieser Knall wird durch das heftige Eindringen der Luft hervorgebracht.

Fig. 113.

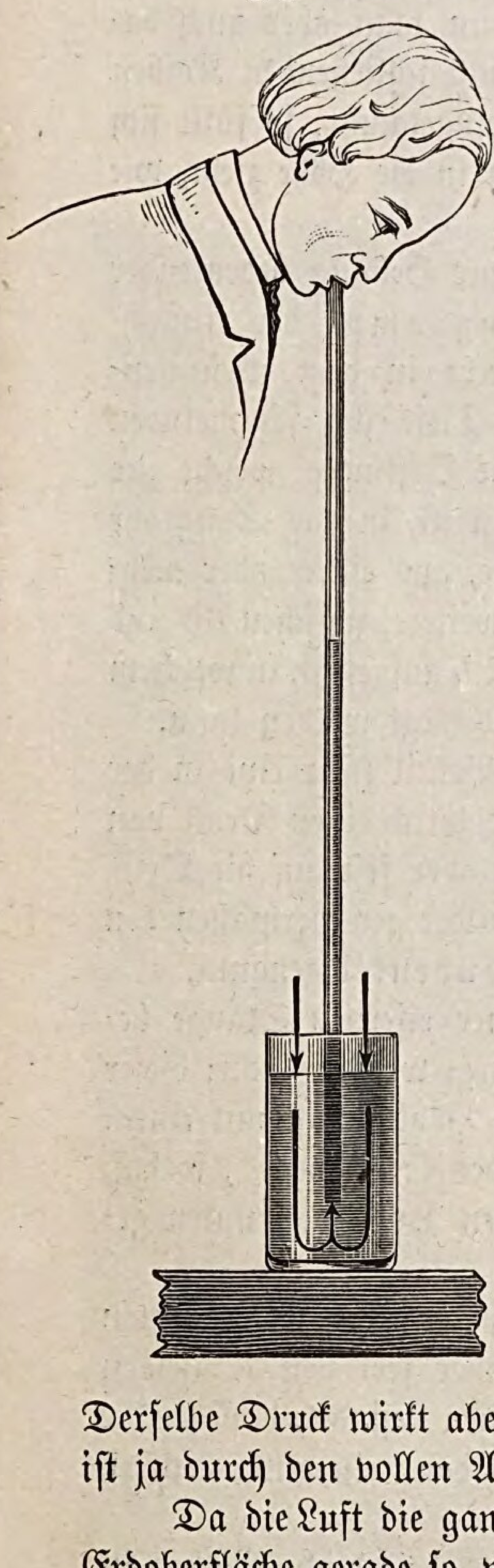
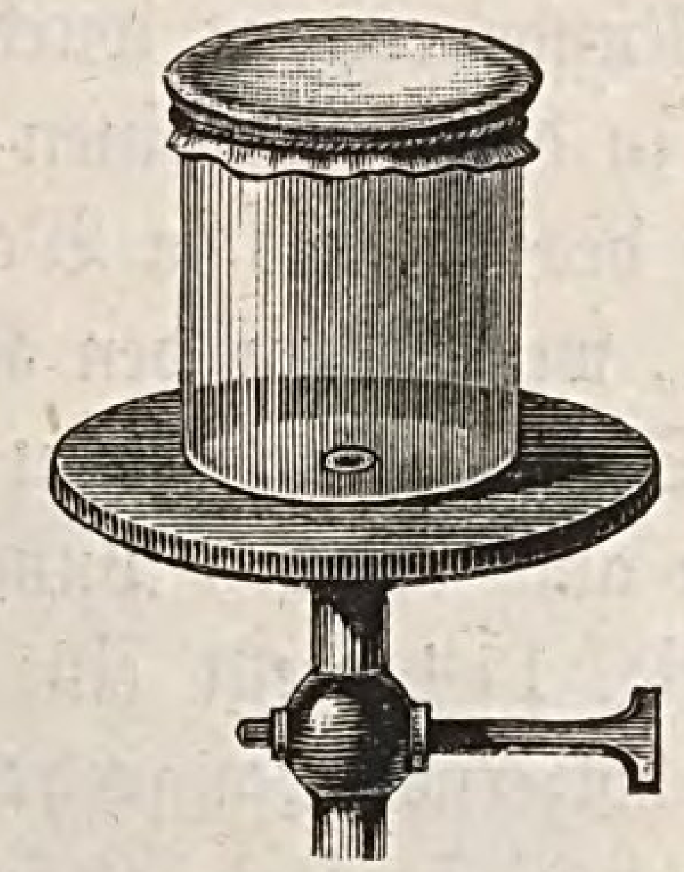


Fig. 112.



Hätte man die ganze Anordnung so geändert, daß die Blase eine schräge Stellung gehabt oder daß der Luftdruck von unten nach oben gewirkt hätte, so würde man denselben Effect erhalten haben, weil die Luft nach allen Seiten hin auf gleiche Weise drückt.

Bei diesem Versuch scheint auf den ersten Blick auffallend, daß die Luft, welche sich in einem Zimmer befindet, einen so ungeheuren Druck ausüben soll. Von dem Gewichte der Luftsäule, welche auf der Blase ruht und sich von derselben bis zu der Decke des Zimmers erstreckt, kann diese Wirkung freilich nicht herrühren; denn selbst eine Wassersäule von dieser Höhe könnte sie kaum hervorbringen. Hätte man den Versuch unter freiem Himmel angestellt, so hätte die Blase offenbar den Druck einer Luftsäule auszuhalten gehabt, deren Höhe gleich ist der Höhe der ganzen Atmosphäre. Derselbe Druck wirkt aber auch noch im Zimmer, denn die Luft des Zimmers ist ja durch den vollen Atmosphärendruck gepreßt.

Da die Luft die ganze Erde umgiebt, so preßt sie auf alle Gegenstände der Erdoberfläche gerade so wie auf die Blase beim Versuch Fig. 112; sie drückt ebenso auf alle Festländer wie auf die Gewässer. Taucht man das eine Ende

einer auf beiden Seiten offenen Röhre in ein mit Wasser gefülltes Gefäß, so wird sich die Flüssigkeit in der Röhre so hoch stellen wie außerhalb, weil der Luftdruck in der Röhre gerade so auf das Niveau der Flüssigkeit wirkt wie außerhalb. Saugt man aber einen Theil der Luft mit dem Munde aus der Röhre aus, wie es Fig. 113 (a. v. S.) andeutet, so steigt die Flüssigkeit in derselben. Durch dieses Saugen wird nämlich der Luftdruck im Innern der Röhre vermindert, während der äußere Luftdruck unverändert bleibt. Der Ueberschuß des äußeren Luftdrucks preßt die Flüssigkeit im Innern der Röhre in die Höhe, bis das Gewicht der gehobenen Wassersäule ihm das Gleichgewicht hält.

54 **Pumpen.** Die Luftverdünnung, welche bei dem eben besprochenen Versuch durch Saugen mit dem Munde erzeugt wurde, kann man aber auch dadurch hervorbringen, daß man in das Rohr einen luftdicht schließenden Kolben einsetzt. Ist das untere Ende des Rohres in Wasser eingetaucht, so füllt sich das Rohr mit dieser Flüssigkeit, wenn man den Kolben in die Höhe zieht, wie sich dies an den gewöhnlichen Spritzbüchsen zeigen läßt.

Dieses Princip wird nun auch bei den Pumpen zur Hebung bedeutender Wassermengen angewandt. Fig. 114 stellt eine Saugpumpe der einfachsten Construction dar. Das hölzerne Saugrohr *a* steht in dem Brunnenschacht, und zwar geht es unter den Spiegel des in der Tiefe sich sammelnden Wassers *B* hinab. Das Wasser kann durch eine seitliche Oeffnung, welche zur Abhaltung von Unreinigkeiten durch ein Sieb verschlossen ist, in das Saugrohr eintreten. Auf das nach Umständen kürzere oder längere, aus einem oder mehreren Stücken bestehende Saugrohr *a* ist nun das etwas weitere, zwischen 60 und 100 cm hohe, genau cylindrisch ausgebohrte Kolbenrohr *b* aufgesetzt, in welchem ein Kolben luft- und wasserdicht schließend auf- und abbewegt werden kann.

Das obere Ende des Saugrohrs *a* ist durch ein Ventil (hier eine in der Mitte mit Metall beschlagene Lederkappe) bedeckt, welches durch einen Druck von unten gehoben, also geöffnet, durch einen Druck von oben aber fest auf die Oeffnung aufgedrückt, also geschlossen wird. Dieses Ventil bildet gewissermaßen den Boden des Kolbenrohres *b* und wird deshalb das Bodenventil genannt.

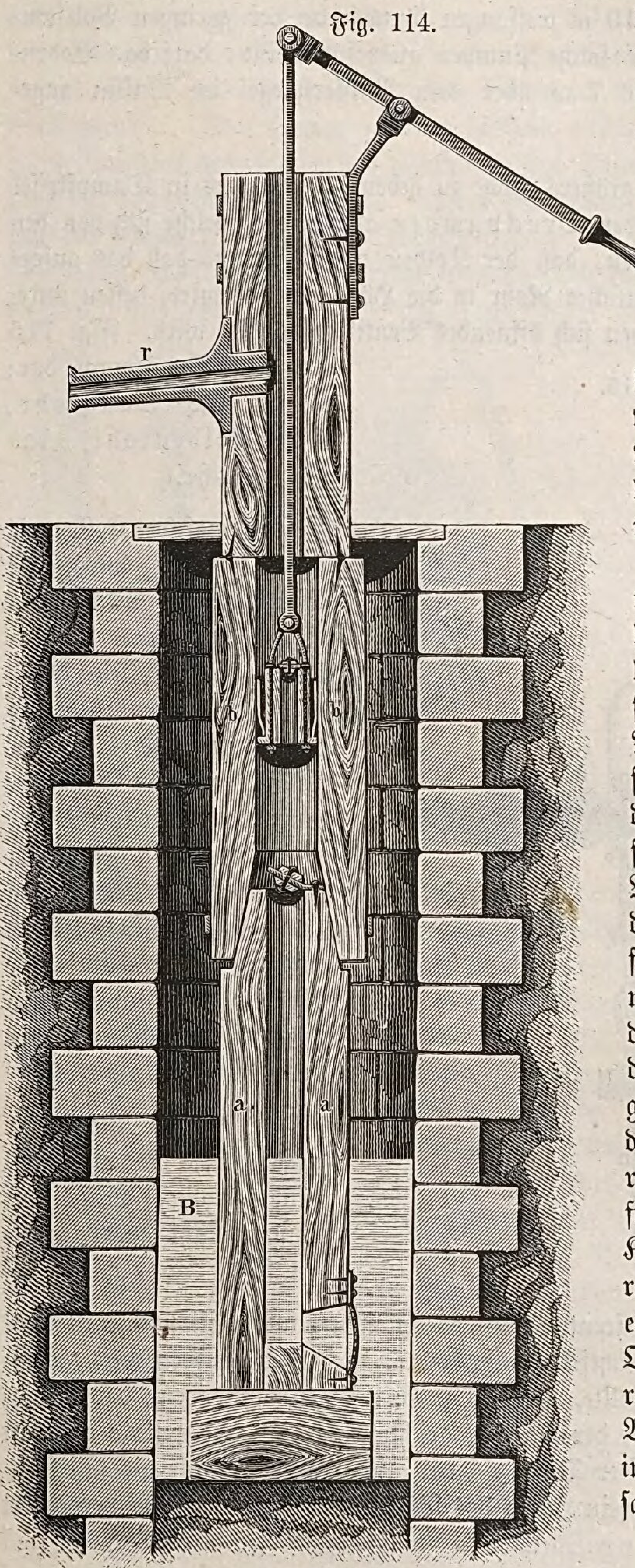
Der im Kolbenrohr befindliche Kolben ist an einer eisernen Stange befestigt, welche durch eine passende Hebelvorrichtung bewegt werden kann; dieser Kolben ist selbst wieder hohl, und das obere Ende dieser Höhlung ist mit einem Ventil in gleicher Weise versehen wie das obere Ende des Saugrohres, so daß es durch einen Druck von oben geschlossen, durch einen Druck von unten geöffnet wird.

Der Umfang dieses Kolbens ist durch eine Lederkappe gebildet, welche unten um den hölzernen Kolben herum festgenagelt ist, oben aber frei von demselben absteht, so daß, wenn sich einmal Wasser über dem Kolben befindet, dasselbe die Lederkappe fest gegen die Röhrenwände anpreßt, wodurch dann ein guter Schluß erhalten wird.

Wenn der eben im unteren Ende des Kolbenrohres befindliche Kolben in die Höhe gezogen wird, so wirkt er wie ein massiver Kolben, weil sich das Kol-

benventil schließt, und es bildet sich unter demselben ein luftverdünnter Raum;

Fig. 114.



das Bodenventil öffnet sich, und das Wasser steigt in dem Saugrohre in die Höhe. Beim Niedergang des Kolbens schließt sich zunächst das Bodenventil, wodurch das Zurückfallen des aufgesaugten Wassers verhindert wird, das Kolbenventil aber öffnet sich und läßt die noch im Kolbenrohre befindliche Luft durch.

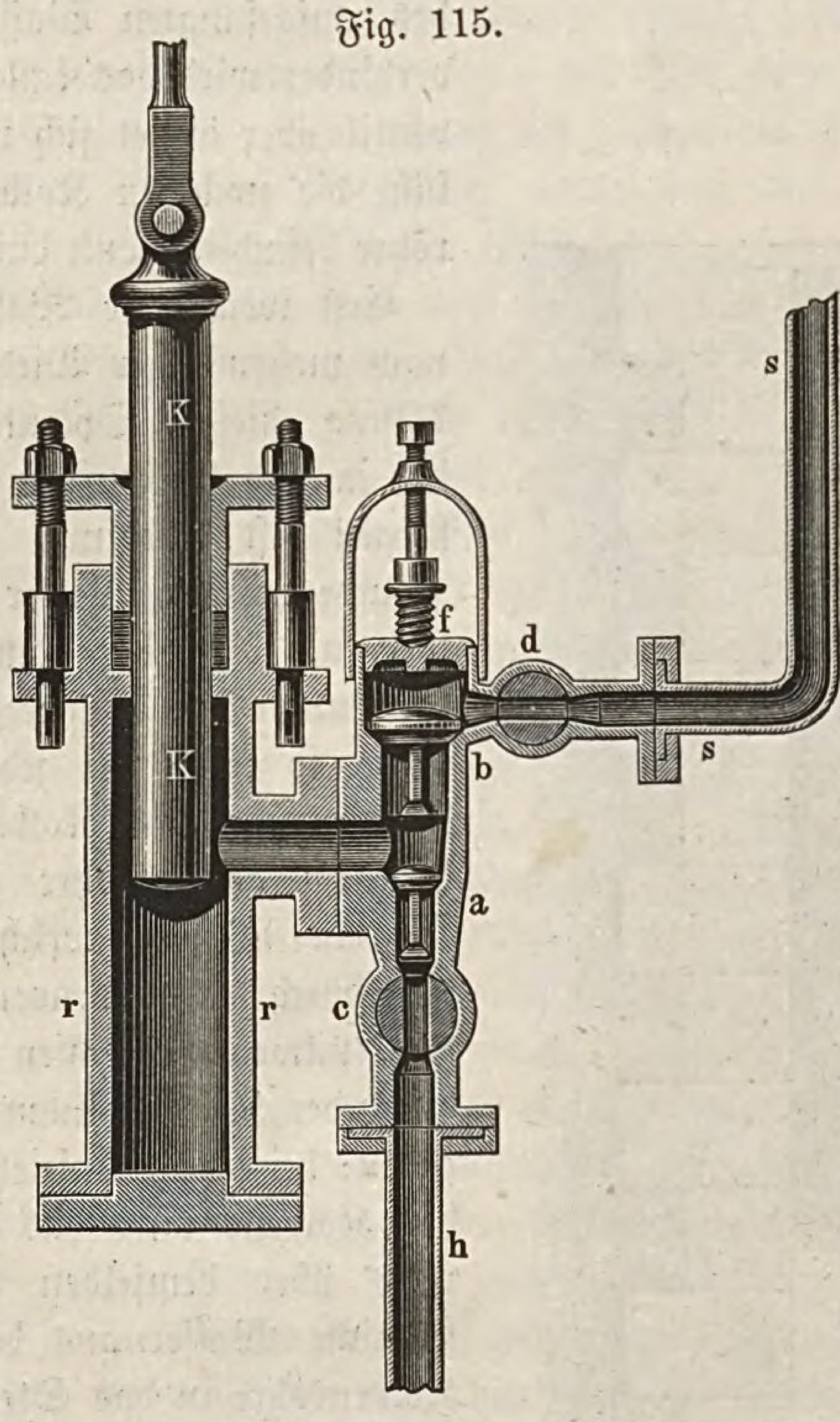
Erst wenn das Wasser nach mehrmaliger Wiederholung dieser Operation bis in das Kolbenrohr gestiegen ist, beginnt die Pumpe wirklich Wasser zu fördern. Ist aber einmal die Pumpe mit Wasser gefüllt, so wird bei jedem Niedergange des Kolbens das im Kolbenrohre befindliche Wasser, welchem nun durch das Bodenventil der Rückweg verschlossen ist, durch den Kolben hindurchgehen; bei jedem Aufziehen des Kolbens wird das bereits über demselben befindliche Wasser aus dem Kolbenrohre in das Steigrohr gehoben, aus welchem es dann durch die seitliche Oeffnung *r* abfließt, während zugleich eine neue Wassermenge von unten her in das Kolbenrohr aufgesaugt wird.

Bei vollkommen luft-

dichtem Schluß des Kolbens und der Ventile würde man bei mittlerem Luftdruck das Wasser bis zu 10 m aufsaugen können; bei der geringen Vollkommenheit jedoch, mit welcher solche Pumpen ausgeführt sind, darf das Bodenventil nicht wohl mehr als 7 m über dem Wasserspiegel im Bassin angebracht sein.

Um das Wasser auf größere Höhe zu heben, oder um es in Dampfkessel hineinzupressen u. s. w., werden Druckpumpen angewandt, welche sich von den vorigen dadurch unterscheiden, daß der Kolben massiv ist und daß das aufgesaugte Wasser durch ein seitliches Rohr in die Höhe gedrückt wird, dessen unteres Ende durch ein nach oben sich öffnendes Ventil geschlossen wird. Fig. 115 stellt eine Druckpumpe dar; *h* ist das Saugrohr, *r* das Kolbenrohr, *s* das Steigrohr.

Fig. 115.



Der massive Kolben *K* geht luftdicht durch die Stopfbüchse, welche das obere Ende des Kolbenrohrs schließt. Beim Aufgang des Kolbens hebt sich das Saugventil *a*, um Wasser aus dem Saugrohr durchzulassen, während das Druckventil *b* geschlossen bleibt; beim Niedergang des Kolbens schließt sich *a*, und das vorher aufgesaugte Wasser wird nun durch das geöffnete Ventil *b* in das Steigrohr *s* gepreßt.

Bei *d* und *c* sind Hähne angebracht, die man abstellen kann, wenn die Pumpe nicht mehr arbeiten soll.

Der Deckel *f* kann entfernt werden, wenn man die Ventile nachsehen will. Er ist durch eine starke Drahtfeder aufgedrückt, so daß er gehoben wird, wenn der Druck zu stark werden sollte, wie dies z. B. erfolgen kann, wenn das Steigrohr sich verstopft hat oder der Hahn *d* geschlossen bleibt, während *c* offen ist und die Ventile spielen. Der Deckel *f* dient also in diesem Falle als Sicherheitsventil, indem durch sein Heben das Bersten der Röhrenwände verhindert wird.

Der Heber. Wenn man ein Trinkglas, dessen Rand recht eben ist 55
(am besten ein geschliffenes Glas), ganz mit Wasser füllt, ein Papier darauf deckt und dann das Glas umkehrt, so läuft das Wasser nicht aus; der gegen die untere Fläche des Papiers wirkende Luftdruck hindert das Herabfallen der Wassermasse. Das Papier ist nur deshalb nöthig, um zu verhindern, daß beim Umkehren des Glases das Wasser an den Seiten ausläuft und statt dessen Luft in das Gefäß eindringt. Wenn die untere Oeffnung klein genug ist, um ein solches Auslaufen zu verhindern, wie dies beim Stechheber der Fall ist, so ist das Papier nicht mehr nöthig. Der Stechheber ist gewöhnlich ein röhrenförmiges Gefäß, Fig. 116 und 117, welches oben und unten etwas enger ist und an jedem Ende eine kleine Oeffnung hat. Taucht man den Stechheber, wenn beide Oeffnungen frei sind, ganz in eine Flüssigkeit, so füllt er sich mit derselben, und wenn man nun die obere Oeffnung mit dem Daumen verschließt, so kann man ihn in die Höhe ziehen, ohne daß die in demselben enthaltene Flüssigkeit ausläuft.

Fig. 116.

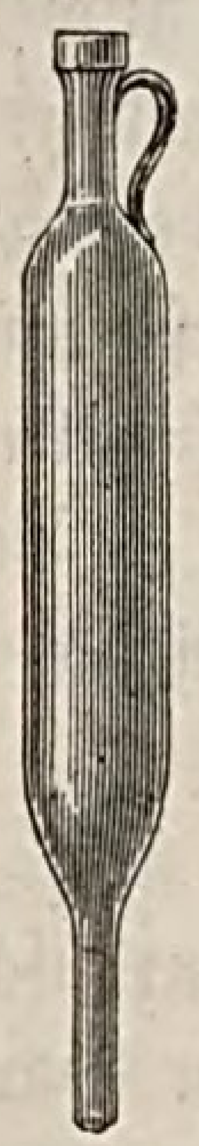


Fig. 117.

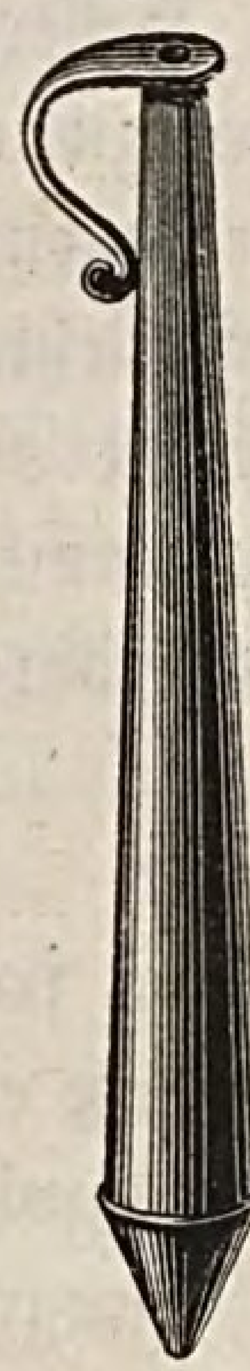
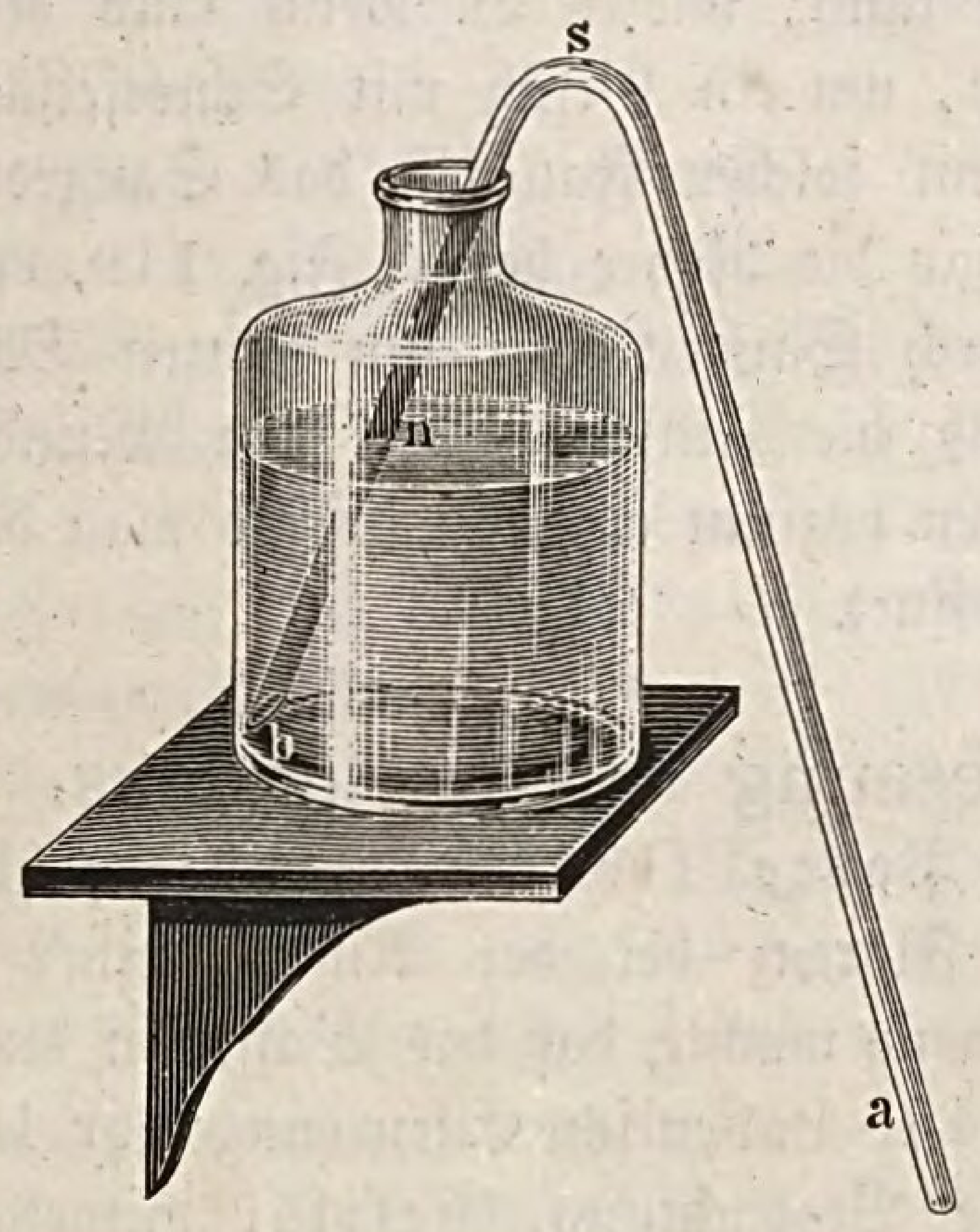


Fig. 118.

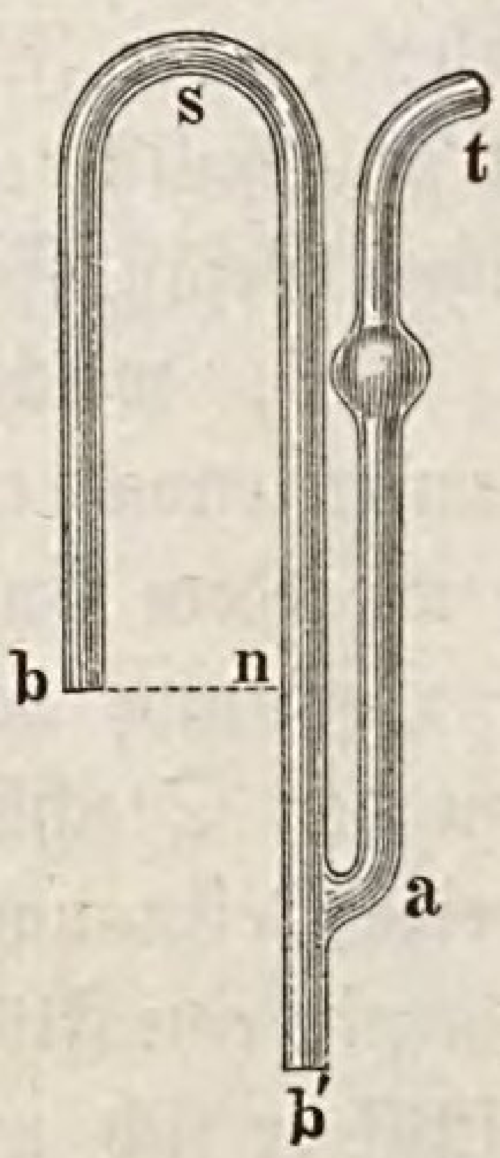


Der Heber ist eine gekrümmte Röhre, *bsa*, Fig. 118, deren Schenkel ungleiche Länge haben. Wenn der kürzere Schenkel in eine Flüssigkeit eingetaucht ist und man die ganze Röhre durch Saugen bei *a* mit derselben gefüllt hat, so läuft die Flüssigkeit am Ende *a* des längeren Schenkels, welches tiefer liegt als *b*, fortwährend aus; man kann also mit Hülfe eines Hebers leicht ein Gefäß entleeren, ohne an demselben eine Veränderung vorzunehmen. Die Wirkung des Hebers ist leicht zu erklären. Auf der einen Seite hat die Wassersäule *sa*, auf der anderen die Wassersäule von *s* bis zum Spiegel *n* der Flüssigkeit im Gefäß ein Bestreben, vermöge ihrer Schwere herabzufallen; der Schwere der in beiden Schenkeln befindlichen Wassersäulen wirkt aber auf beiden Seiten der Luftdruck entgegen, welcher auf der einen Seite gegen die Oeffnung *a*, auf der anderen aber auf den Spiegel des Wassers im Gefäß wirkt und dadurch die Bildung eines leeren Raumes im Innern der Röhre verhindert, der sich nothwendigerweise bei *s* bilden würde, wenn die Wassersäulen auf beiden Seiten herabliefen. Da der Luftdruck auf der einen Seite so stark wirkt, wie auf der anderen, so würde vollkommenes Gleichgewicht stattfinden, wenn die Wassersäulen in den beiden Schenkeln gleich hoch wären, wenn sich also die Oeffnung *a* in der Höhe des Wasserspiegels *n* im Gefäß befände; sobald aber *a* tiefer liegt, erhält die Wassersäule im Schenkel *sa* das Uebergewicht und in

dem Maaße, als hier das Wasser ausläuft, wird auf der anderen Seite durch den Luftdruck von Neuem Wasser in die Röhre hineingetrieben, so daß das Ausfließen bei *a* fortdauert, so lange der Flüssigkeitsspiegel sich über den Oeffnungen *b* und *a* befindet.

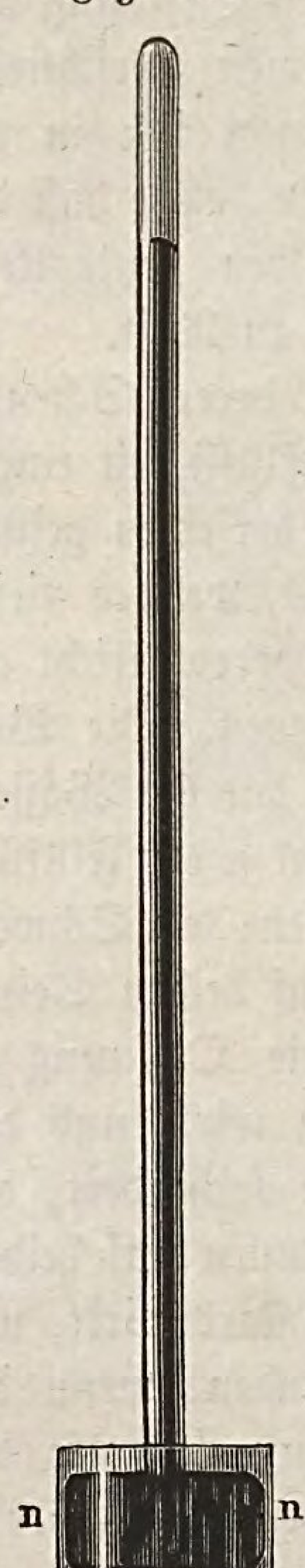
Um den Heber bequem füllen und in Wirksamkeit setzen zu können, wird an demselben eine Saugröhre *at*, Fig. 119, angebracht. Einen gewöhnlichen Heber füllt man nämlich dadurch, daß man bei *a* Fig. 118, saugt; dabei ist aber nicht zu vermeiden, daß man etwas von der Flüssigkeit in den Mund bekommt, was in manchen Fällen unangenehm, oft sogar gefährlich sein kann, wie z. B. wenn man den Heber anwenden will, um ein Gefäß mit Schwefelsäure zu entleeren. In einem solchen Falle ist das Saugrohr unentbehrlich; wenn man die Röhre bei *b'*, Fig. 119, verschließt, so kann man durch Saugen bei *t* den ganzen Schenkel *sb'* füllen, ohne daß die Flüssigkeit an den Mund kommt. Das Auslaufen beginnt alsdann, sobald man das Röhrenende *b'* wieder öffnet.

Fig. 119.



56 **Messung des Luftdrucks.** Der französische Physiker Pascal (1623 bis 1662) erzählt, daß ein Gärtner in Florenz bei der Anlage einer Saugpumpe die Beobachtung machte, daß das Wasser in dem Saugrohr nicht höher als 18 italienische Ellen (ungefähr 10 m) hinaufsteige. Als diese Beobachtung Galiläi mitgetheilt wurde, hielt er dieselbe für so unglaublich, daß er sich erst durch eigenen Augenschein davon überzeugen ließ. Man hatte nämlich bisher das Ansteigen der Flüssigkeiten durch Saugen durch den Satz erklärt, daß die Natur einen Abscheu vor dem leeren Raume, einen horror vacui habe. Galiläi, der nun das Ungereimte dieses Satzes sogleich erkannte, gab eine andere, jedoch gleichfalls unrichtige Erklärung, indem er behauptete, das Aufsteigen rühre von der Cohäsion der Wassertheilchen und ihrer Adhäsion an den Kolben her. Erst Galiläi's Schüler, Torricelli (1608 bis 1647), gelang es, die wahre Ursache der Erscheinung in dem Drucke der Luft aufzufinden und dafür den entscheidenden Beweis zu geben. Er machte ungefähr folgende Schlußfolgerung. Damit eine Flüssigkeitssäule einer anderen das Gleichgewicht halte, müssen die Höhen der beiden Säulen sich umgekehrt verhalten wie ihre specifischen Gewichte. Das Quecksilber ist nahe 13,5mal so schwer als Wasser; wenn nun der Druck der atmosphärischen Luft eine Wassersäule von 10 m tragen kann, so muß er demnach auch eine Quecksilbersäule von

Fig. 120.



10 : 13,5 m, d. h. von nahezu 76 cm tragen können. Der Versuch ist leicht anzustellen. Man füllt eine Glasröhre, welche ungefähr 1 m lang und an dem einen Ende zugeschmolzen ist, mit Quecksilber, hält das offene Ende mit dem Finger zu, kehrt die Röhre um und taucht das mit dem Finger verschlossene Ende in ein Gefäß mit Quecksilber, Fig. 120. Zieht man den Finger alsdann weg, so fällt das Quecksilber in der Röhre und zwar so weit, daß die Erhebung des Quecksilbers in der Röhre über das Niveau des Quecksilbers in dem Gefäß so groß ist, wie es aus den eben angeführten Betrachtungen folgt. Die in der Röhre befindliche Quecksilbersäule ist als ein Gegengewicht gegen den atmosphärischen Luftdruck zu betrachten. Dieser Apparat ist das Barometer (Schweremesser). Der leere Raum über der Quecksilbersäule des Barometers heißt die Torricelli'sche Leere.

Die verticale Höhe der Quecksilberkuppe in der Röhre über dem Niveau des Gefäßes wird die Barometerhöhe genannt.

Die Barometerhöhe, also auch die Größe des Luftdrucks ist keineswegs für alle Orte der Erde dieselbe; sie nimmt vielmehr ab mit der Erhebung über den Meeresspiegel, weil ja mit solcher Erhebung die Höhe der über uns befindlichen Luftsäule abnimmt. In einer Höhe von 5600 m über dem Meeresspiegel ist die Barometerhöhe kaum halb so groß als am Ufer des Meeres.

Darauf gründet sich die Anwendung des Barometers zu Höhenmessungen. Wenn man gleichzeitig am Fuße eines Berges und auf dem Gipfel desselben den Barometerstand mißt, so kann man aus dem Verhältniß der beiden Barometerstände auf den Höhenunterschied der beiden Stationen schließen. Näheres über barometrische Höhenmessung findet man im Supplementbande.

Aber auch an einem und demselben Orte ist der Barometerstand veränderlich, wie dies weiter unten in der Meteorologie ausführlicher besprochen werden soll.

Am Ufer des Meeres beträgt die mittlere Barometerhöhe 76 cm. Eine Quecksilbersäule von dieser Höhe und von 1 qcm Grundfläche hat einen Cubikinhalt von 76 ccm. Da nun 1 ccm Quecksilber 13,59 g wiegt, so ist der Druck dieser Säule auf ihre Basis 76 $\times$ 13,59 g $=$ 1,033 kg. Bei einem Barometerstande von 76 cm drückt also die atmosphärische Luftsäule auf ein Flächenstück von 1 qcm Inhalt mit einem Gewichte von 1,033 kg oder auf 1 qm mit einem Gewichte von 10 330 kg.

Dieser Druck (1,033 kg auf jedes Quadratcentimeter oder 10 330 kg auf jedes Quadratmeter) wird als Atmosphärendruck oder als Druck einer Atmosphäre bezeichnet.

Construction des Barometers. Fig. 120 zeigt das Barometer in seiner ursprünglichen Form, bei welcher das Rohr und das Gefäß nicht fest zusammenhängende Stücke sind. Bei dem gewöhnlichen Barometer sind jedoch Rohr und Gefäß in der Weise zu einem einzigen Stücke verbunden, wie es Fig. 121 (a. f. S.) zeigt; das unten umgebogene Rohr endigt nämlich mit einer oben offenen Erweiterung, welche das Gefäß des Barometers bildet. Wenn das 57

Gefäß etwas weit ist in Vergleich zu dem Durchmesser der Röhre, so sind die Schwankungen der Säule fast ohne Einfluß auf das Niveau des Quecksilbers im Gefäß, so daß man, wenn keine große Genauigkeit gefordert wird, dieses Niveau als constant betrachten kann. Bei diesen Barometern, die man zu genauen Untersuchungen nicht gebrauchen kann, befindet sich in der Regel die Scala auch nur am oberen Theile des Instrumentes.

Solche Barometer, welche nach der Art der in Fig. 120 oder Fig. 121 gezeichneten construirt sind, nennt man **Gefäßbarometer**.

Fig. 121.

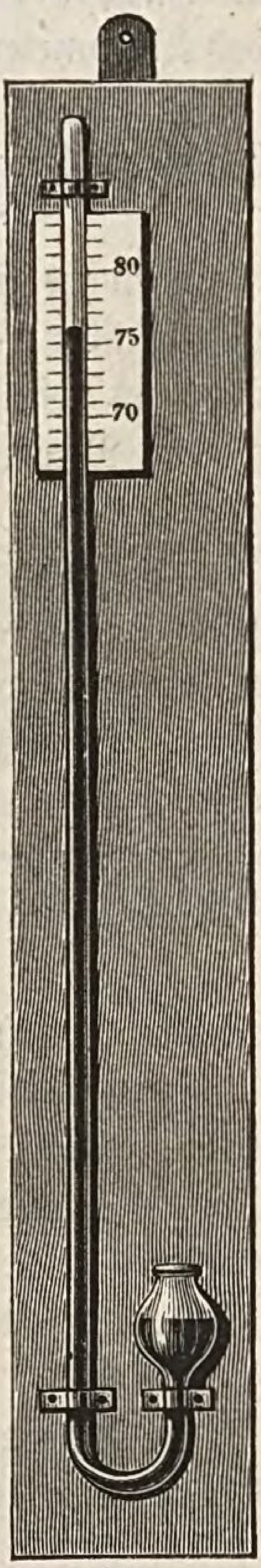
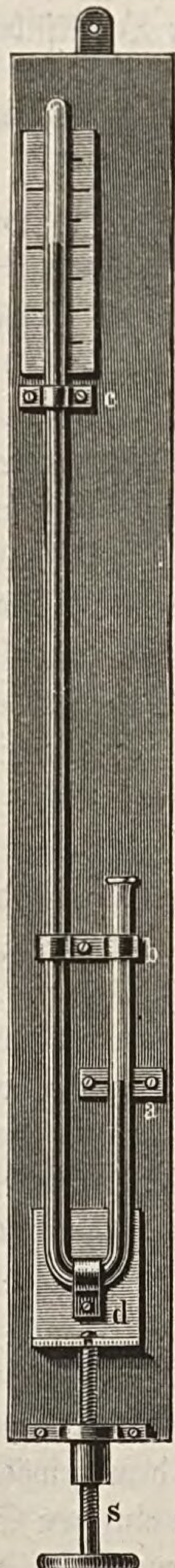


Fig. 122.



Eine andere Grundform des Barometers ist das **Heberbarometer**, Fig. 122. Dasselbe ist aus einem heberförmig gebogenen Glasrohre verfertigt, so daß also der Quecksilberspiegel, auf welchen der Luftdruck wirkt, sich in einer Röhre befindet, welche eben so weit ist wie das Röhrenstück, welches die obere Quecksilberkuppe enthält.

Es ist klar, daß in solchen Instrumenten bei verändertem Luftdruck die beiden Kuppen ihren Stand gleichzeitig ändern, und zwar wird die obere stets um so viel steigen, als die untere fällt, und umgekehrt.

Um mit Hülfe eines solchen Instrumentes die wahre Barometerhöhe zu finden, macht man entweder die Scala oder das Barometerrohr selbst verschiebbar. In beiden Fällen stellt man das Instrument vor dem Ablesen der oberen Kuppe so ein, daß der Gipfel der unteren Kuppe mit dem Nullpunkt der Theilung zusammenfällt.

Unsere Figur stellt ein Barometer dar, bei welchem das Rohr selbst verschiebbar ist. Es ist auf der Messingplatte d befestigt, welche mit Hülfe der Schraube s auf- und niedergeschoben werden kann, wodurch dann auch das Barometerrohr selbst gehoben oder gesenkt wird, indem die messingenen Halter b und c dasselbe zwar auf dem Brette halten, aber doch eine Verschiebung in verticalem Sinne gestatten.

Sind Rohr **und** Scala fest, so ist

eine Ablesung der oberen und der unteren Kuppe nöthig, um die Barometerhöhe zu erfahren.

Welche Form man auch einem Barometer geben mag, immer müssen gewisse Bedingungen erfüllt sein, wenn das Instrument genau die Größe des Luftdrucks angeben soll. Zunächst muß die Höhe der Quecksilbersäule genau gemessen werden können, und das ist nur möglich, wenn das Rohr eine vollkommen verticale Stellung hat. Die Scala befindet sich entweder auf einem Messingstreifen, welcher in das Brett eingelassen ist, oder sie ist auf das Rohr selbst eingeätzt.

Der Raum über der Quecksilbersäule muß vollkommen luftleer sein, was man nur dadurch vollständig erreicht, daß man das Quecksilber in der Röhre kocht; denn nur dadurch ist es möglich, alle Luft und alle Feuchtigkeit, welche an den Glaswänden anhaften, zu entfernen. Das Auskochen der Barometer ist eine Operation, welche viel Uebung und Geschicklichkeit erfordert. Wenn in der Torricelli'schen Leere noch etwas Luft zurückgeblieben ist, so erkennt man dies daran, daß sich beim Neigen des Rohres dasselbe nicht vollständig mit Quecksilber füllt, sondern daß ein kleines Luftbläschen am Gipfel der Röhre zurückbleibt. Der Fehler, der daraus entsteht, ist um so geringer, je größer das Volumen der leeren Kammer ist.

Endlich muß das Quecksilber vollkommen rein und der Durchmesser der Röhre darf nicht zu klein sein. Wenn die Röhre zu eng ist, so übt die Adhäsion und die Reibung des Quecksilbers an den Glaswänden einen so bedeutenden Einfluß aus, daß die Quecksilberkuppe oft in einer Höhe stehen bleibt, welche bald höher, bald tiefer ist, als sie der Größe des Luftdrucks nach sein sollte. Wenn man in einem solchen Falle das Barometer etwas anstößt, so sieht man die Quecksilbersäule augenblicklich etwas steigen oder fallen, je nachdem der vorherige Stand zu tief oder zu hoch war, weil durch den Anstoß das Hinderniß der Bewegung überwunden wird.

Das Mariotte'sche Gesetz. Dieses Gesetz bezieht sich auf die 58
Volumveränderung einer Gasmasse bei Veränderung des auf ihr lastenden Druckes und lautet: Das Volumen einer gegebenen Gasmasse verhält sich umgekehrt wie der Druck, dem sie ausgesetzt ist. Bezeichnen wir also mit V das Volumen einer gegebenen Gasmenge, welche unter dem Druck P, mit v das Volumen derselben Gasmenge, wenn sie unter dem Druck p steht, so haben wir

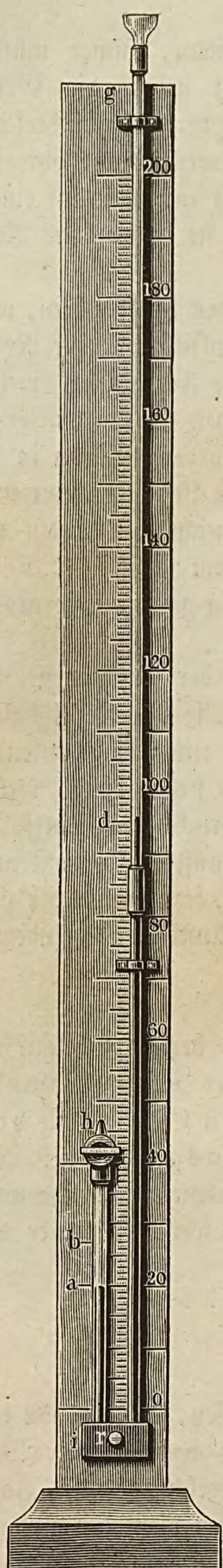
$$V : v = p : P \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

oder auch

$$vp = VP \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Das durch Gleichung 1) oder 2) ausgesprochene Gesetz, welches von dem englischen Physiker Boyle (1661) gefunden wurde, wird irrthümlicher Weise nach dem französischen Physiker Mariotte benannt, welcher es 16 Jahre später nochmals entdeckte. Um es experimentell zu prüfen dient der Apparat Fig. 123 (a. f. S). In zwei verticale, durch einen horizontalen Canal verbundene

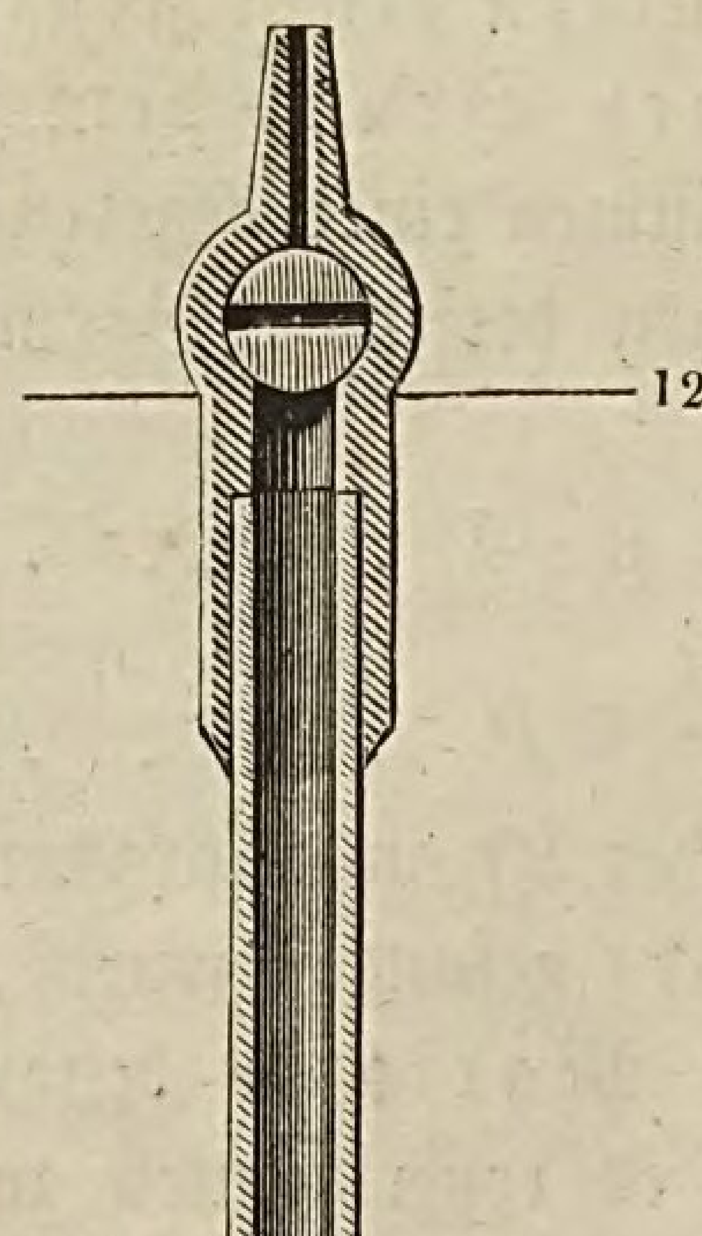
Fig. 123.



Löcher des Eisenstücks *i* sind zwei Glasröhren eingekittet, eine kürzere, die Manometerröhre, welche etwa 40 cm lang, oben mit einem Hahn versehen ist, dessen Einrichtung durch Fig. 124 erläutert wird, und eine längere, die Druckröhre, welche oben offen und über 2 m lang ist. Beide Röhren sammt der eisernen Fassung sind auf einem in Centimeter getheilten Brett befestigt; der Nullpunkt der Theilung befindet sich etwas über dem Eisenstück. Während nun der Hahn der Manometerröhre offen ist, wird durch die Druckröhre so viel Quecksilber eingegossen, daß es in beiden Röhren eben bis zum Nullpunkt reicht, und dann der Hahn geschlossen. Es ist nun in der Manometerröhre eine Luftsäule von einer bestimmten, auf dem getheilten Brett abzulesenden Länge abgesperrt, welche gerade unter dem Druck der Atmosphäre steht. Um diese Luftsäule auf $1/2$ oder $1/3$ ihrer ursprünglichen Länge zu comprimiren muß man in der Druckröhre so viel Quecksilber aufgießen, daß es das Niveau des Quecksilbers im kurzen Rohre um die einfache (wie in unserer Figur) oder um die doppelte Höhe der Barometersäule überragt, daß also nun die abgesperrte Luft einem Druck von zwei oder drei Atmosphären ausgesetzt ist. Arago (1786 bis 1853) und Dulong (1785 bis 1838) haben bewiesen, daß dieses Gesetz für atmosphärische Luft wenigstens bis zu einem Drucke von 27 Atmosphären noch keine Aenderung erleidet.

Durch diese Versuche ist die Richtigkeit des Mariotte'schen Gesetzes von einem Drucke von 1 Atmosphäre, bis zu einem Drucke von 27 Atmosphären bewiesen; für einen Druck aber, welcher geringer ist als 1 Atmosphäre, kann man es mit Hülfe des folgenden Apparates bestätigen.

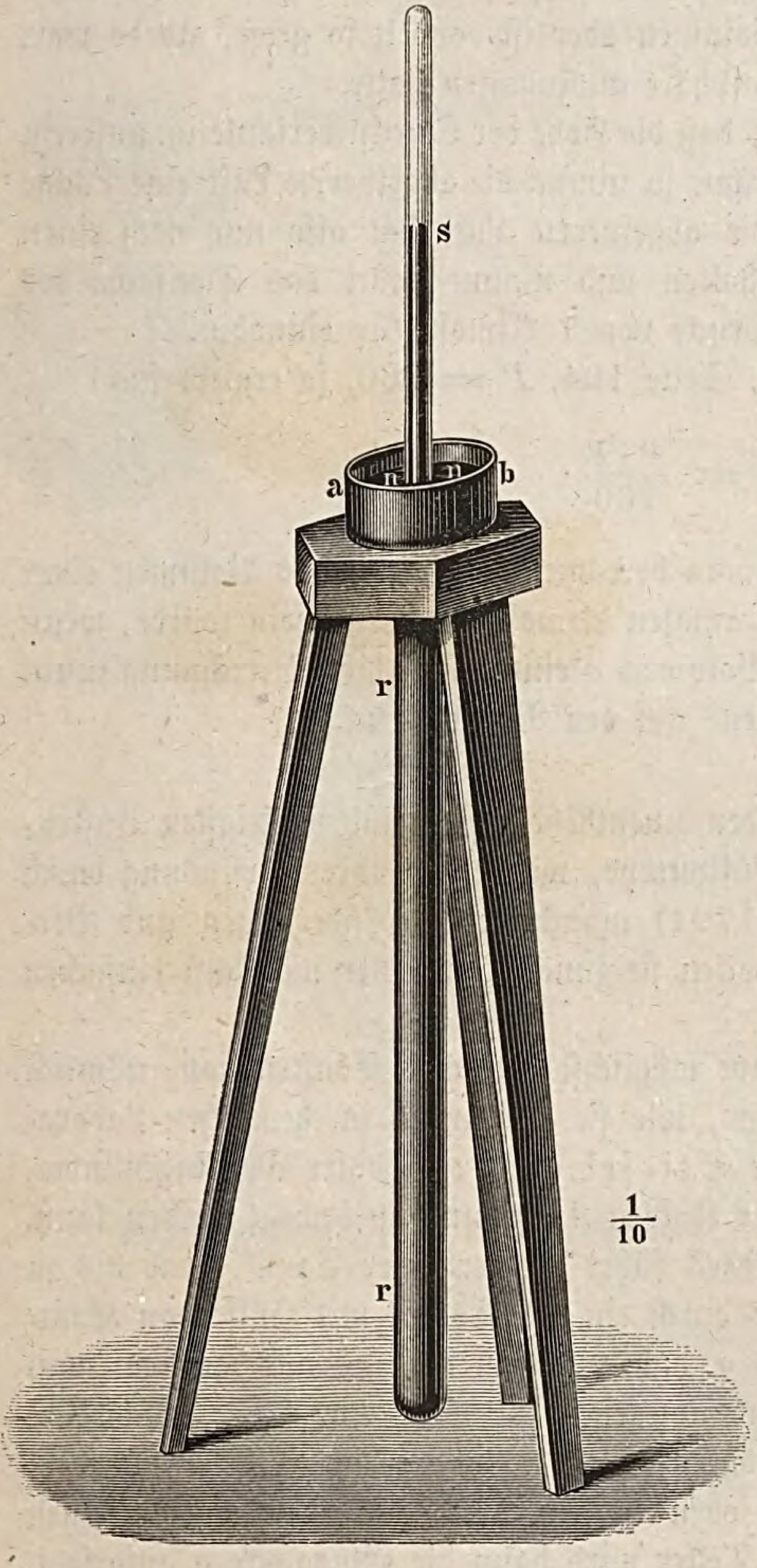
Fig. 124.



Eine 2 bis $2^1/_2$ cm weite eiserne Röhre *r*, Fig. 125, welche oben in ein weiteres Gefäß endigt und unten geschlossen ist, wird in einem passenden Stativ vertical aufgestellt und etwa bis *n* mit Quecksilber vollgegossen. Nun füllt man eine Barometerröhre, wie zum Torricelli'schen Versuche, mit Quecksilber, je-

doch nur so weit, daß noch etwa 5 bis 8 cm nicht mit Quecksilber angefüllt sind. Verschließt man die Oeffnung mit dem Finger und kehrt man dann die Röhre um, so wird die Luftblase in den oberen Theil der Röhre hinaufsteigen. Wenn man nun, wie beim Torricelli'schen Versuche, das untere Ende der Röhre in das Quecksilber des Gefäßes ab taucht und dann den Finger von der Oeffnung wegzieht, so wird die Quecksilbersäule im Barometerrohre bis auf einen bestimmten Punkt fallen. Man wird aber sogleich bemerken, daß der Gipfel der Quecksilbersäule nicht so hoch über nn steht, als die Barometerhöhe beträgt, weil ja im oberen Theile unserer Röhre sich Luft befindet und kein Vacuum, wie beim Barometer.

Fig. 125.



Wenn man die Röhre niederdrückt, so daß sie weiter und weiter in das Quecksilber des weiten Rohres hinabreicht, so wird das Volumen der oben eingeschlossenen Luft immer kleiner. Drückt man gar die Röhre so weit hinab, daß das Quecksilber im Rohre genau in der Höhe des Quecksilberspiegels nn steht, so steht die abgesperrte Luft genau unter dem Drucke einer Atmosphäre.

Die Höhe der abgesperrten Luftsäule, welche dem Drucke von einer Atmosphäre ausgesetzt ist wird nun gemessen; sie betrage 5 cm.

Zieht man das Rohr wieder in die Höhe, so vermehrt sich das Volumen der abgesperrten Luft, zugleich aber erhebt sich auch die Quecksilberkuppe im Rohre über den Spiegel nn. Gesetzt, man habe das Rohr so weit gehoben, daß die Höhe der Quecksilberkuppe s über den Spiegel nn gerade die Hälfte des im Augenblick zu beobachtenden Barometerstandes beträgt, so wird die abgesperrte Luft eine Länge von 10 cm in der Röhre einnehmen. Bei einem Barometerstande von

76 cm wäre dies der Fall, wenn die Quecksilberkuppe gerade 38 cm über *nn* stände.

Die Hälfte des atmosphärischen Drucks ist also durch die Quecksilbersäule, welche sich unter der abgesperrten Luft befindet, aufgehoben, und der Druck, welchen diese abgesperrte Luft auszuhalten hat, ist nur noch dem Drucke einer halben Atmosphäre gleich, ihr Volumen aber ist doppelt so groß, als es war, da sie den Druck der ganzen Atmosphäre auszuhalten hatte.

Hebt man die Röhre so weit, daß die Höhe der Quecksilbersäule in unserem Rohre $^2/_3$ der Barometerhöhe beträgt, so nimmt die abgesperrte Luft eine Länge von 15 cm in der Röhre ein; die abgesperrte Luft hat also nur noch einen Druck von $^1/_3$ Atmosphäre auszuhalten und nimmt dabei das Dreifache des Raumes ein, den sie unter dem Drucke von 1 Atmosphäre einnahm.

Setzen wir in Gleichung 2), Seite 104, $P = 760$, so ergiebt sich

$$V = \frac{v \cdot p}{760}.$$

Nach dieser Gleichung kann man berechnen, wie groß das Volumen einer gegebenen Gasmenge unter dem normalen Atmosphärendruck sein würde, wenn dieselbe unter dem Drucke p das Volumen v einnimmt; diese Berechnung nennt man die Reduction des Luftvolumens auf den Normaldruck.

59 **Die Luftpumpe.** Zu den unentbehrlichsten und wichtigsten Instrumenten des Physikers gehört die Luftpumpe, welche seit ihrer Erfindung durch Otto von Guerike (1628 bis 1704) mancherlei Veränderungen und Verbesserungen erfahren hat. Wir wollen sie zunächst in einer möglichst einfachen Gestalt kennen lernen.

Fig. 126 stellt eine Luftpumpe möglichst einfacher Construction, nämlich eine sogenannte Handluftpumpe dar, wie sie gewöhnlich in chemischen Laboratorien gebraucht wird. CC ist der Stiefel, d. h. ein hohler Messingcylinder, in welchem ein luftdicht schließender Kolben A auf und ab bewegt werden kann.

Von dem Boden des Cylinders führt ein verticaler Canal herab bis zu dem horizontalen Rohre s, welches durch ein Glasrohr t mit Hülfe von Kautschukröhrchen mit dem Recipienten g, d. h. mit dem Raume, aus welchem man die Luft entfernen will, in Verbindung gesetzt werden kann. Die Glasröhre t verbindet nämlich die Messingröhren s und p, von welchen letztere zu dem verticalen Canale ab führt, der oben in der Mitte des eben abgeschliffenen Tellers dd mündet. Auf diesen Teller wird dann die Glasglocke g aufgesetzt, deren unterer Rand gleichfalls eben abgeschliffen ist, und der des besseren Schlusses wegen mit Talg oder Schweinefett bestrichen wird.

Der Kolben A ist aus verschiedenen Stücken zusammengesetzt, nämlich erstens aus einem zum Theil hohlen Messingstück K, welches von einer Lederkappe umgeben ist, die fest an die Wände des Cylinders andrückt und namentlich beim Aufziehen des Kolbens noch durch den von oben her wirkenden Luftdruck an dieselben gepreßt wird, und zweitens aus einem von unten her in K

eingeschraubten Metallstück L, welches in der Mitte durchbohrt ist und die Bodenplatte des Kolbens bildet.

Dieses Metallstück L ist oben mit einem Ventil versehen, welches durch ein Stück Schweinsblase gebildet wird, das man so über das Metallstück bindet, daß es die Oeffnung des verticalen Canals verschließt, und dann seitlich von

Fig. 127.

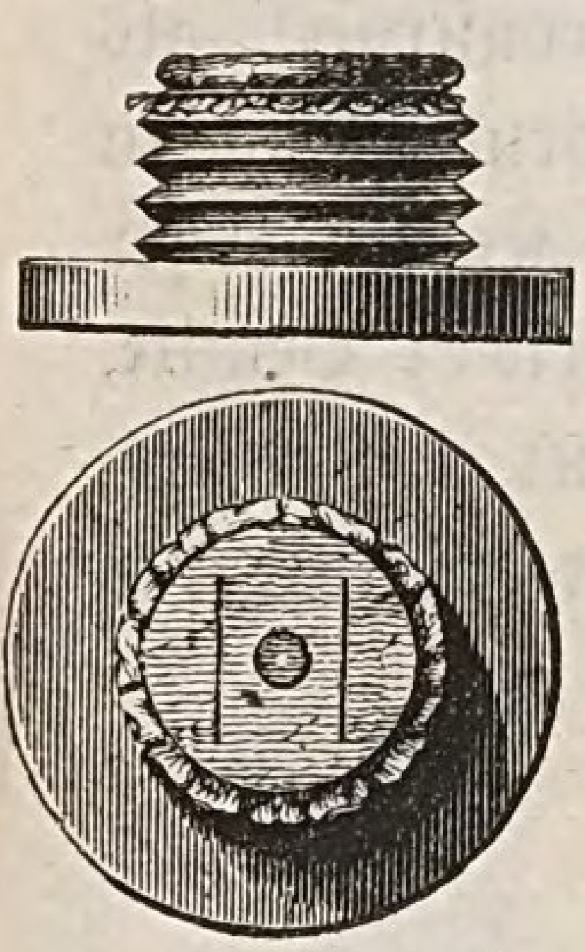
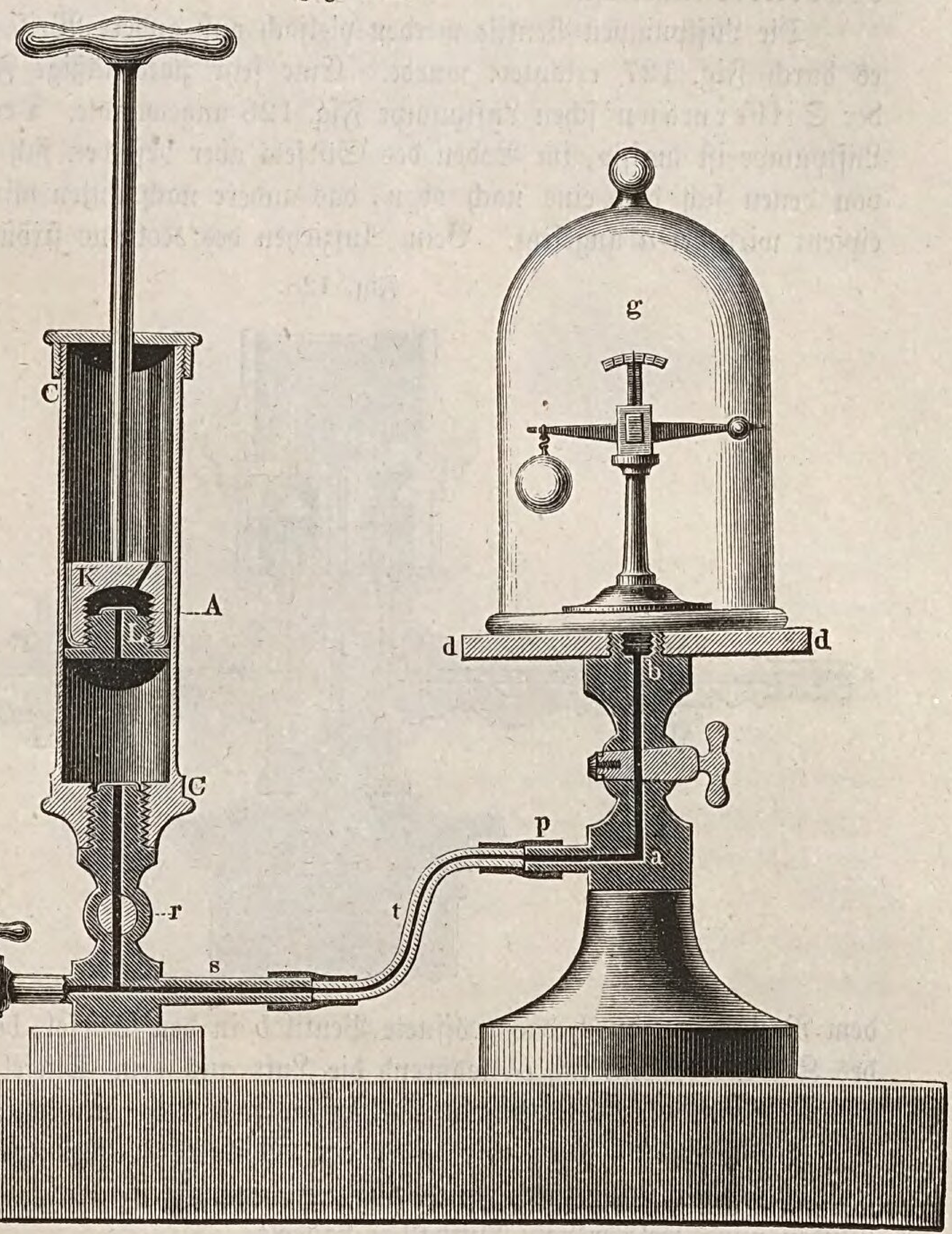
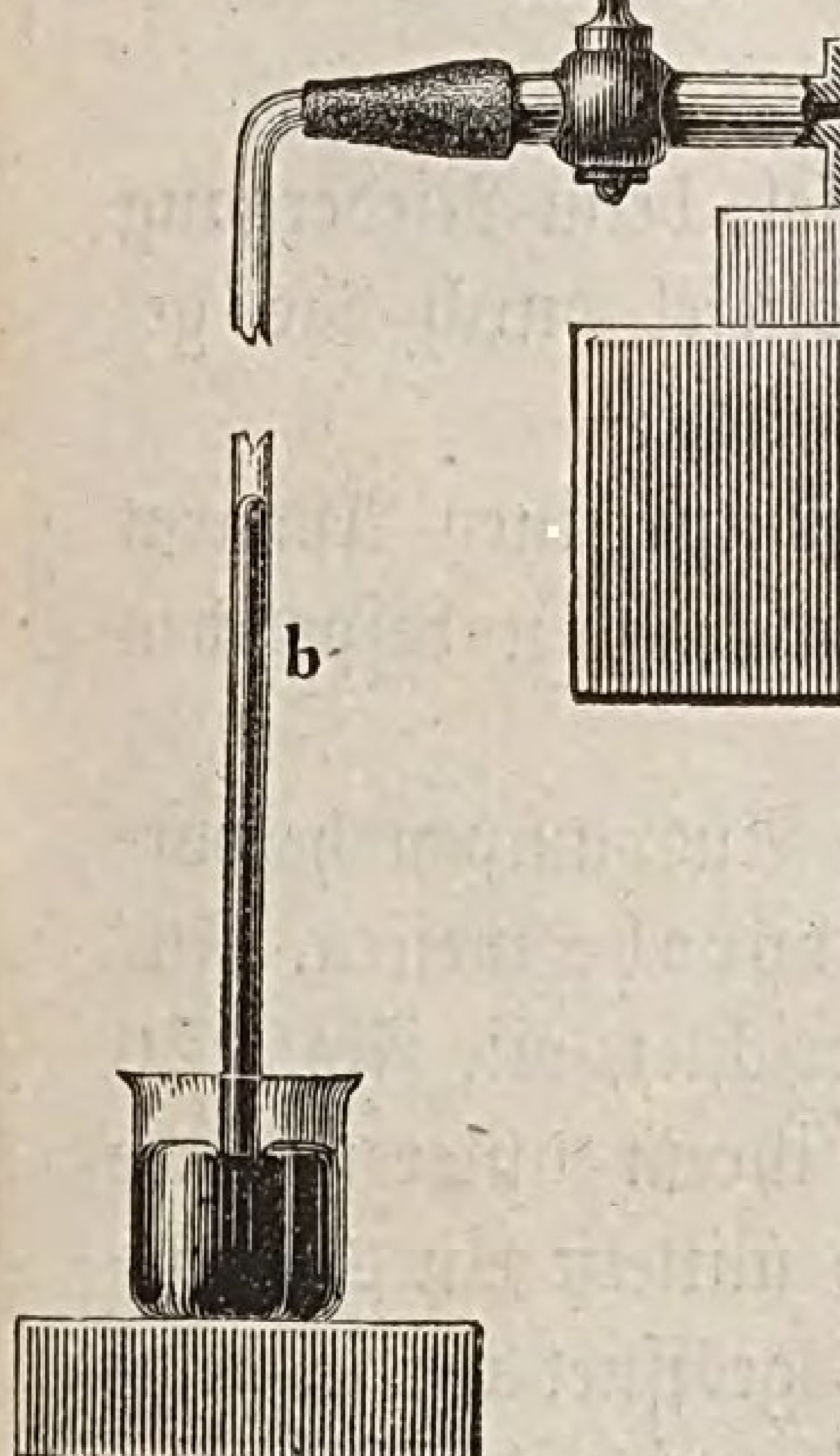


Fig. 126.





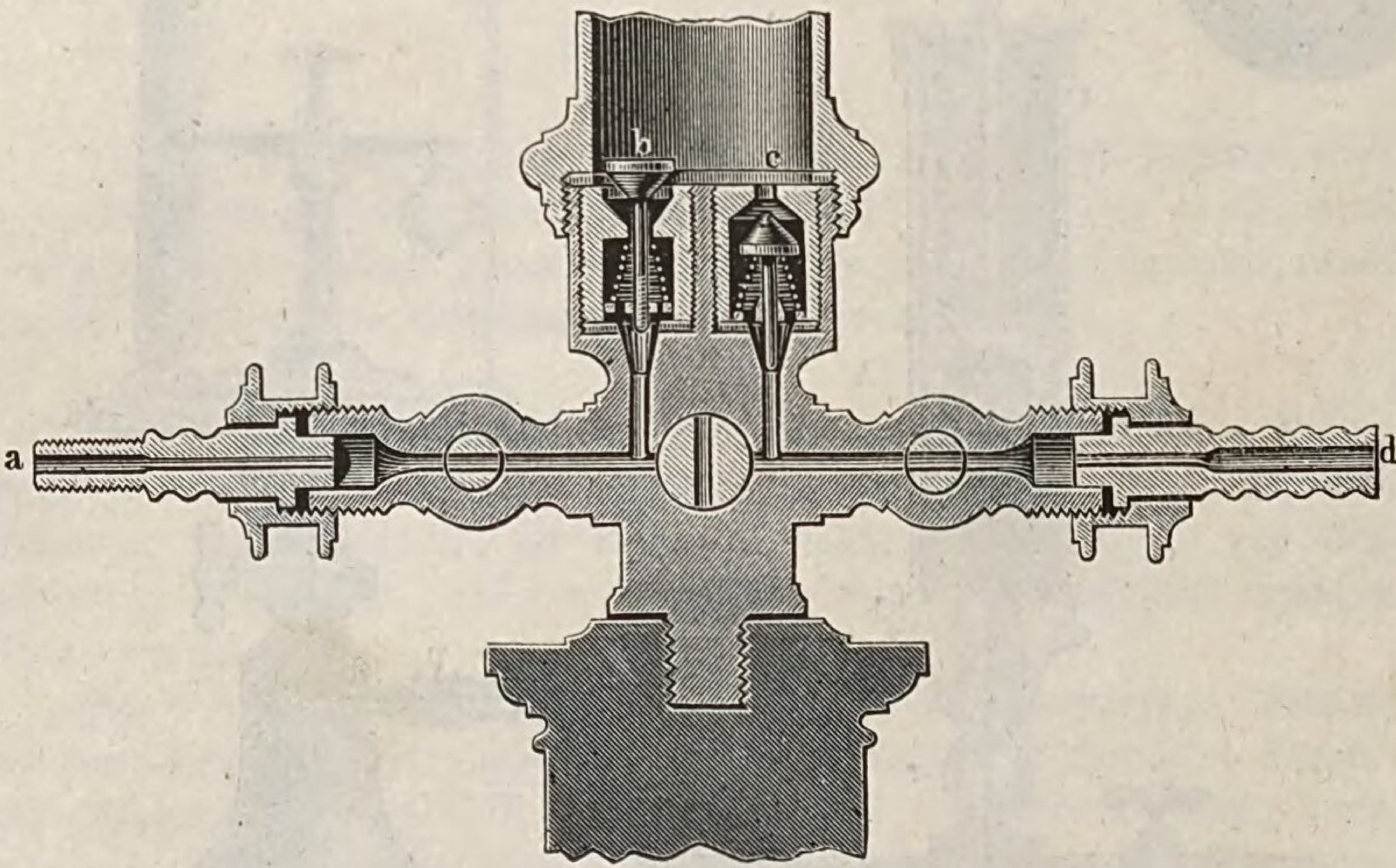
dieser Oeffnung mit zwei Einschnitten versieht, wie Fig. 127 zeigt, die das fragliche Stück in größerem Maaßstabe im Grund- und Aufriß darstellt.

Dieses Ventil wird auf die Oeffnung fest aufgepreßt, wenn der Luftdruck von oben her, es wird geöffnet, wenn er von unten her stärker ist.

Ein ähnliches Ventil ist auch über der centralen Oeffnung der Bodenplatte des Cylinders angebracht. Beim Aufziehen des Kolbens öffnet sich dieses Bodenventil und die Luft strömt aus dem Recipienten in den Stiefel. Beim Niederdrücken des Kolbens schließt sich das Bodenventil und hindert den Rückgang der Luft in den Recipienten, während sie durch das geöffnete Kolbenventil entweicht.

Die Luftpumpen-Ventile werden vielfach auf andere Weise construirt, als es durch Fig. 127 erläutert wurde. Eine sehr zweckmäßige Form ist die in der Silbermann'schen Luftpumpe Fig. 128 angewandte. Der Kolben dieser Luftpumpe ist massiv, im Boden des Stiefels aber befinden sich zwei Ventile, von denen sich das eine nach oben, das andere nach unten öffnet. Der Recipient wird bei *a* angesetzt. Beim Aufziehen des Kolbens strömt die Luft aus

Fig. 128.



dem Recipienten durch das geöffnete Ventil *b* in den Stiefel, beim Niedergang des Kolbens schließt sich *b*, während die Luft aus dem Stiefel durch das geöffnete Ventil *c* ausströmt und bei *d* in die freie Luft entweicht.

In Fig. 126 sehen wir unter der Glocke der Luftpumpe einen Apparat stehen, welcher erst später, und zwar in demjenigen Paragraphen besprochen werden wird, welcher vom Luftballon handelt.

Den Grad der Luftverdünnung, welchen man durch Auspumpen hervorgebracht hat, kann man durch eine sogenannte Barometerprobe messen. Für die kleinen Handluftpumpen ist die Barometerprobe so eingerichtet, wie Fig. 126 zeigt. Eine etwa 90 cm lange Glasröhre *b* taucht mit ihrem unteren Ende in ein Gefäß voll Quecksilber; oben ist sie umgebogen und mittelst eines Kautschukröhrchens an die Pumpe befestigt. Wenn der Hahn *n* geöffnet ist, so steigt das Quecksilber in der Röhre *b*, und zwar um so höher, je weiter die Verdünnung getrieben wird. Wenn es möglich wäre, einen ganz luftleeren Raum

durch die Luftpumpe zu erzeugen, so würde die Höhe der im Rohre *b* gehobenen Quecksilbersäule der Barometerhöhe gleich sein.

Gewöhnlich bedient man sich, um den durch die Luftpumpe hervorgebrachten Grad der Verdünnung zu messen, eines abgekürzten Heberbarometers als Barometerprobe. Fig. 129 stellt ein solches in $1/3$ der natürlichen Größe dar. Das Quecksilber füllt den zugeschmolzenen Schenkel bei gewöhnlichem Luftdruck ganz aus. Wird nun dieser Apparat aufrechtstehend unter der Glocke der Luftpumpe angebracht, so beginnt das Quecksilber im geschlossenen Schenkel zu sinken, wenn der auf den offenen Schenkel wirkende Luftdruck auf $1/4$ Atmosphärendruck reducirt ist. Geht nun die Verdünnung der Luft im Recipienten weiter, so giebt die Höhendifferenz der Quecksilberkuppen in beiden Röhren

Fig. 129.

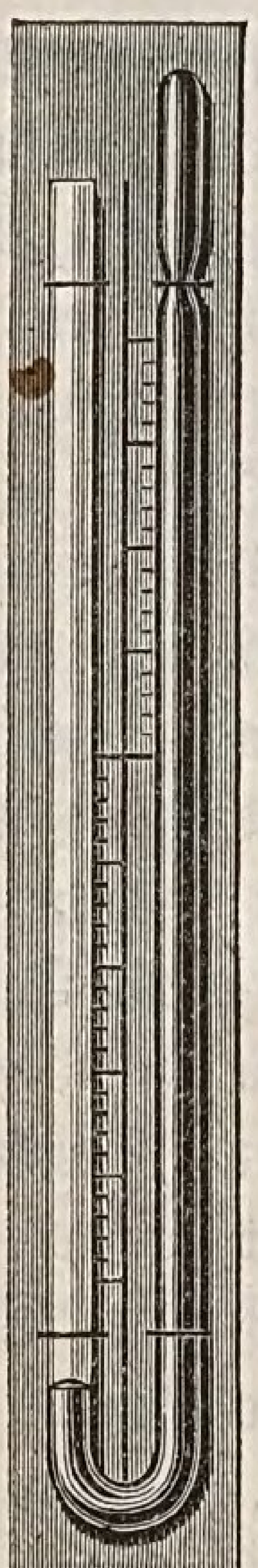


Fig. 130.

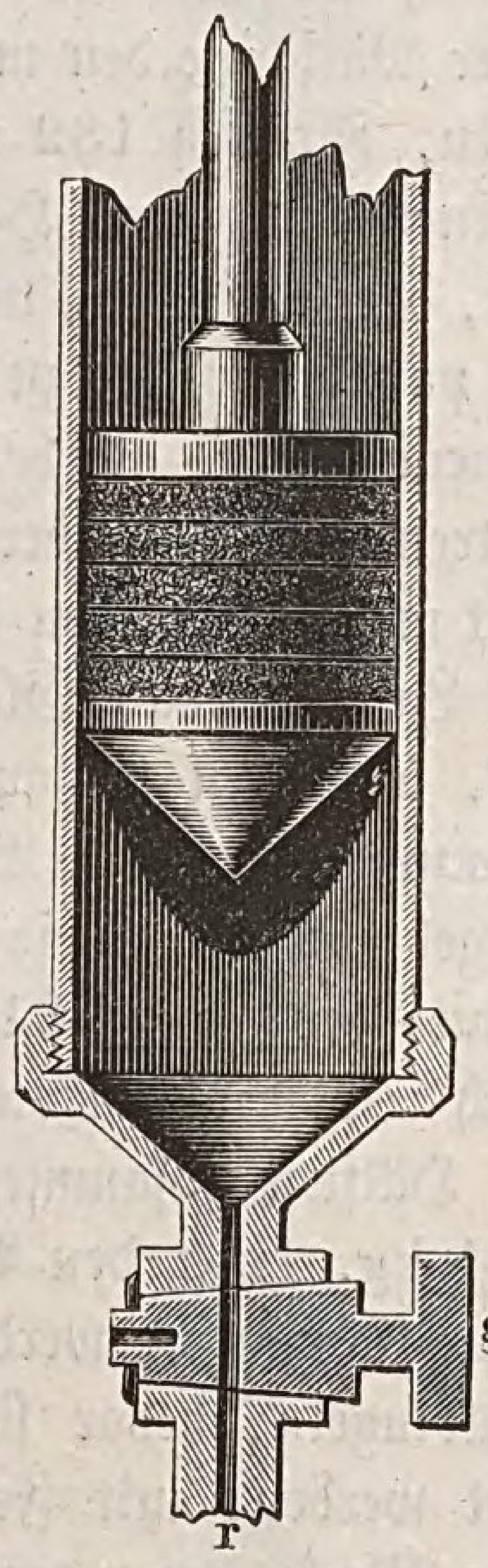
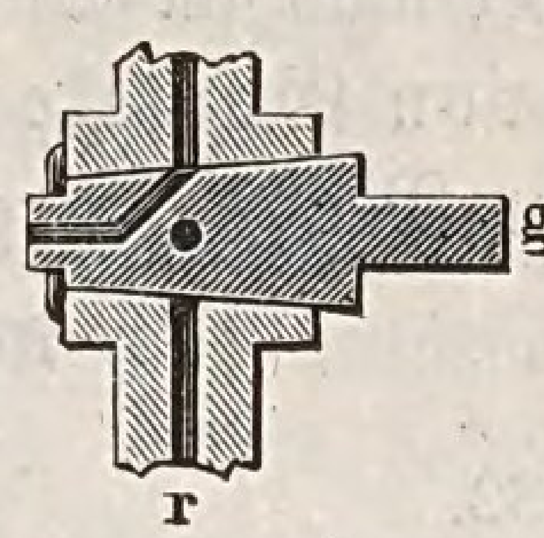


Fig. 131.



die Größe des Druckes an, welchen die unter der Glocke noch zurückgebliebene Luft ausübt.

Anstatt aber diese Barometerprobe unter die Glocke der Luftpumpe zu stellen, ist sie gewöhnlich in einem besonderen kleinen, durch eine enge Glasglocke gebildeten Recipienten angebracht, welcher gleichfalls mit dem zum Stiefel führenden Canal in Verbindung steht und durch einen besonderen Hahn abgestellt werden kann.

Die eben besprochene und abgebildete Luftpumpe war eine Ventilluftpumpe, d. h. eine solche, bei welcher die Unterbrechung und Wiederherstellung der Verbindung des Stiefels sowohl mit dem Recipienten als auch mit der freien Luft durch Ventile bewerkstelligt wird. Für diese Functionen kann aber auch der von Senguerd (1610 bis 1667) construirte Hahn verwendet werden, und solche Luftpumpen, bei welchen dies der Fall ist, heißen Hahnenluftpumpen.

Das Wesentliche der Einrichtung der Hahnenluftpumpe wird durch Fig. 130 erläutert.

Der Senguerd'sche Hahn *g*, welcher sich am unteren Ende des Cylinders befindet, ist doppelt durchbohrt; der eine Canal geht rechtwinkelig zur Umdrehungsaxe gerade durch und vermittelt, wenn der Hahn die Stellung wie in

Fig. 130 hat, die Verbindung des Recipienten mit dem Luftpumpenstiefel. In dieser Stellung verbleibt der Hahn, so lange der Kolben aufwärts gezogen wird; sobald aber der Kolben am obersten Ende seiner Bahn angekommen ist, wird der Hahn um 90^0 gedreht, so daß er in die Stellung Fig. 131 kommt, bei welcher der andere Canal, dessen Lauf durch die Figur hinlänglich erläutert wird, die Verbindung des Stiefels mit der äußeren Luft vermittelt. Wenn nun der Kolben niedergeht, so wird die Luft aus dem Stiefel durch den Seitencanal des Hahnes ausgetrieben.

Ist der Kolben unten angekommen, so wird der Hahn wieder in die Stellung Fig. 130 gebracht u. s. w.

Wie die Verdünnung mit zunehmender Anzahl der Kolbenzüge wächst und welches die Gränze der mit einer Luftpumpe zu erreichenden Verdünnung sei, darüber findet man im Supplementbande nähere Auskunft.

Otto von Guerike machte mit seiner Maschine den merkwürdigen Versuch mit den Magdeburger Halbkugeln, Figuren 132 und 133, welcher darin besteht, eine Hohlkugel von Metall, deren Hälften luftdicht auf einander passen, luftleer zu machen. Vor dem Evacuiren sind die beiden Hälften leicht zu trennen; wenn aber im Inneren keine Luft mehr vorhanden ist, um dem äußeren Luftdruck das Gleichgewicht zu halten, so halten sie außerordentlich stark zusammen. Ist z. B. der Radius der Kugel nur 10 cm, so beträgt der Querschnitt der Kugel 314 qcm, und demnach ist der äußere Druck, welcher die Hälften zusammenpreßt, mehr als 314 kg. Um den Verschluß vollständiger zu machen, werden die Ränder der Halbkugeln, bevor sie auf einander gesetzt werden, mit Fett bestrichen, wie eine Glocke, bevor man sie auf den Teller setzt; ein Hahn, welcher während des Auspumpens geöffnet ist, wird, bevor man die entleerten Halbkugeln von der Luftpumpe abschraubt, geschlossen, um den Wiedereintritt der Luft zu verhindern.

Fig. 132.



Fig. 133.



Man gebraucht die Luftpumpe noch zu mancherlei Versuchen. Man zeigt z. B., daß brennende Körper im luftleeren Raum verlöschen; daß der Rauch als ein schwerer Körper zu Boden fällt; daß Luft im Wasser gleichsam aufgelöst ist; daß sich eine Luftschicht zwischen den Flüssigkeiten und den Wänden der Gefäße befindet, in welchen sie enthalten sind; denn diese Luftschicht zeigt sich in Form kleiner Bläschen, welche in dem Verhältniß wachsen, als der Luftdruck abnimmt. Mit Hülfe der Luftpumpe kann man laues Wasser zum Kochen bringen u. s. w.

Fig. 134.

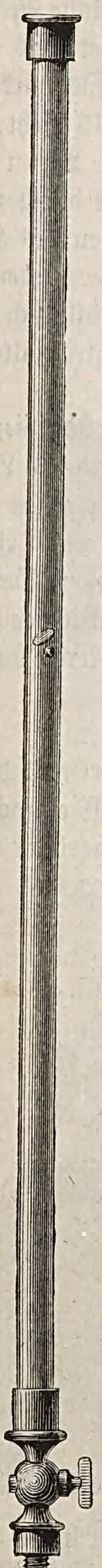
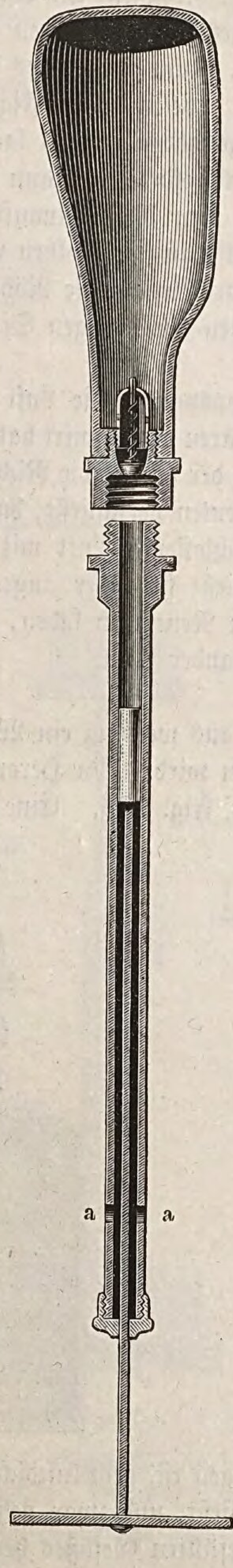


Fig. 135.



Wenn wir sehen, daß ein Stückchen Papier, eine Flaumfeder u. s. w. langsamer zur Erde fällt als ein Stein, so ist die Ursache dieses Unterschiedes nur in dem Widerstande der Luft zu suchen; im luftleeren Raum fallen beide gleich schnell. Man kann dies mittelst der Fallröhre, Fig. 134, auf folgende Weise zeigen.

Die Fallröhre ist eine Glasröhre von ungefähr 3 cm Durchmesser und 150 bis 200 cm Länge, welche oben und unten mit einer Messingfassung luftdicht zugekittet ist. Die untere Fassung enthält einen Hahn und kann auf die Luftpumpe aufgeschraubt werden. In der Röhre befindet sich ein etwas großes Schrotkorn und eine Papierscheibe von ungefähr 4 Linien Durchmesser. Wenn nun die Röhre, nachdem sie luftleer gemacht worden ist, vertical gehalten und dann rasch umgekehrt wird, so fällt das Papierstück und das Bleikügelchen gleich schnell, was nicht der Fall ist, wenn sie noch Luft enthält.

Compressionspumpen. Die Compressionspumpen dienen dazu, die Luft zu verdichten. Hierzu läßt sich die Silbermann'sche Luftpumpe, Fig. 128, S. 114, benutzen; man braucht nur den Recipienten bei *a* zu entfernen und bei *d* einen Recipienten anzusetzen, so wird die beim Aufziehen des Kolbens durch *a* eingesaugte Luft beim Niederdrücken des Kolbens durch *c* und *d* in den Recipienten getrieben. 60

Zur Verdichtung der Luft kann man sich auch einer Hahnenluftpumpe bedienen, wenn man beim Aufziehen des Kolbens dem Hahn *g* die Stellung Fig. 131, S. 115, beim Niederdrücken des Kolbens aber die Stellung Fig. 130 giebt.

Eine der bekanntesten Formen der Compressionspumpe ist die, welche man zum Laden der Windbüchse anwendet. Der Recipient der Windbüchse enthält an seinem unteren Ende ein Ventil, welches sich nach innen öffnet, das also die Luft zwar ein- aber nicht austreten läßt. Zum Zwecke des Ladens wird an diesen Recipienten ein Rohr angeschraubt, wie man in Fig. 135 sieht, in welchem ein Kolben luftdicht auf- und abgeschoben werden kann. Wenn sich der Kolben am unteren Ende des Laderohrs befindet, so kann Luft durch zwei seitliche Löcher *a* eintreten; diese Luft wird nun beim Hinauftreiben des Kolbens in den Recipienten hineingepreßt. Zieht man den Kolben wieder nieder, so kann die Luft aus dem Recipienten nicht zurücktreten, die Röhre füllt sich mit einer neuen Menge Luft, die nun durch einen abermaligen Stoß gleichfalls in den Recipienten gepreßt wird u. s. w.

Wenn man mit Hülfe der Compressionspumpe die Luft im Recipienten der Windbüchse bis auf 8 oder 10 Atmosphären comprimirt hat, wird das Laderohr ab- und ein Lauf angeschraubt, welcher der Kugel die Richtung geben soll. Wird dann das Ventil, welches den Recipienten verschließt, durch den Drücker geöffnet, so entweicht ein Theil der eingeschlossenen Luft mit großer Gewalt und treibt die Kugel fort; das Ventil schließt sich aber augenblicklich wieder. Man kann mit einer Windbüchse, ohne von Neuem zu laden, mehrere, freilich immer schwächer werdende Schüsse nach einander thun.

61 **Der Heronsball** ist ein Gefäß, aus welchem ein Wasserstrahl durch den Druck comprimirter Luft hervorgetrieben wird. Ein Heronsball einfachster Form ist die Spritzflasche der Chemiker, Fig. 136. Eine Glasröhre *acb*,

Fig. 136.

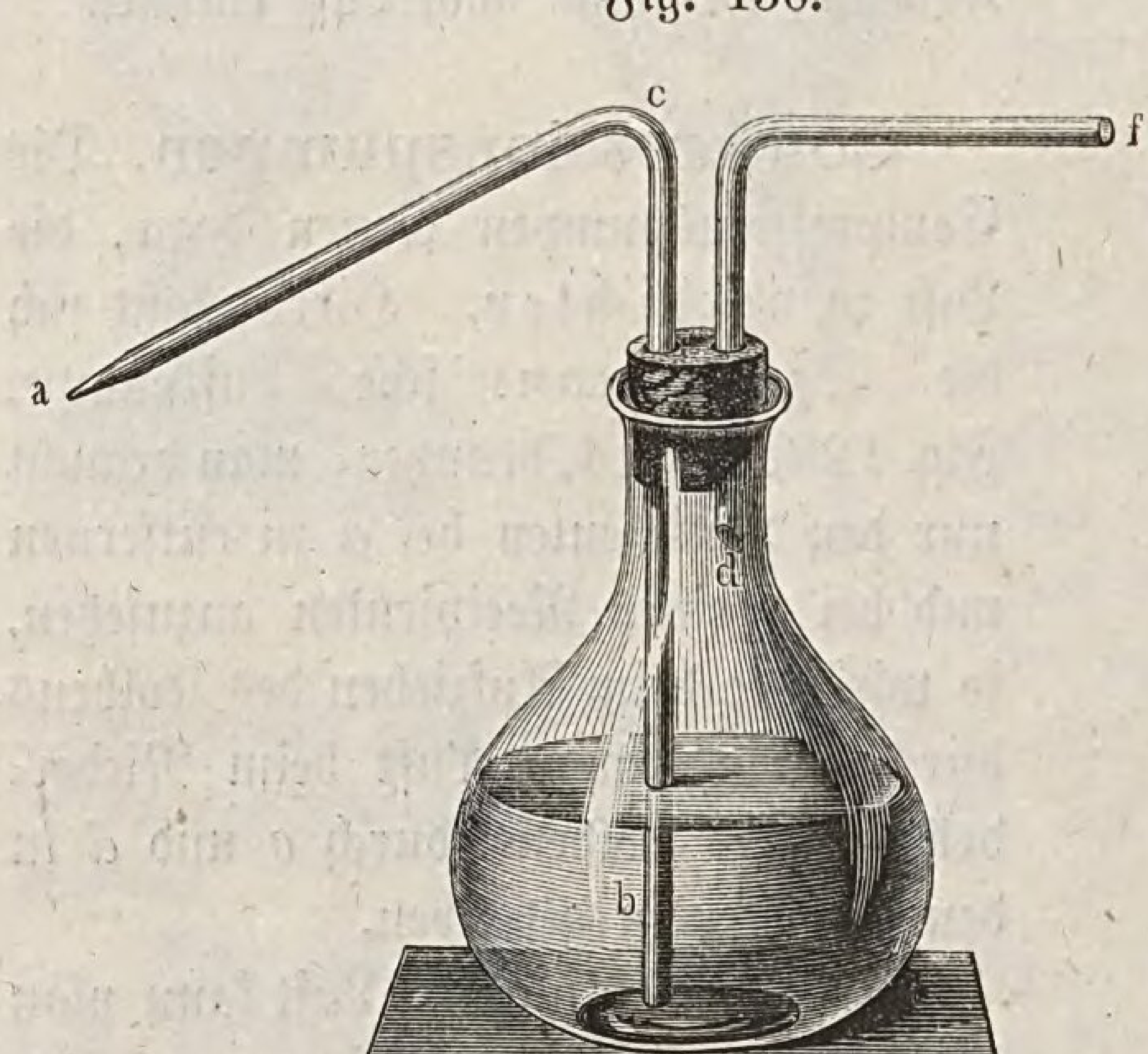
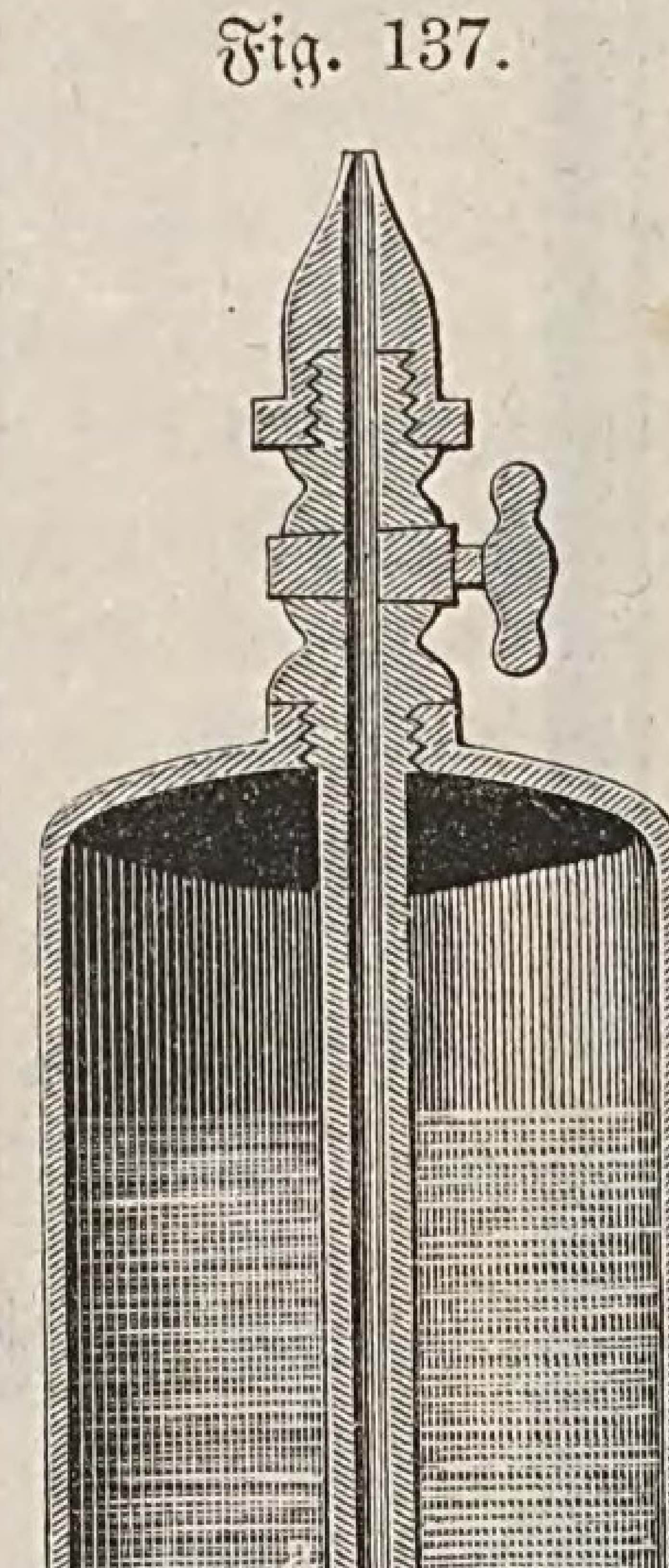


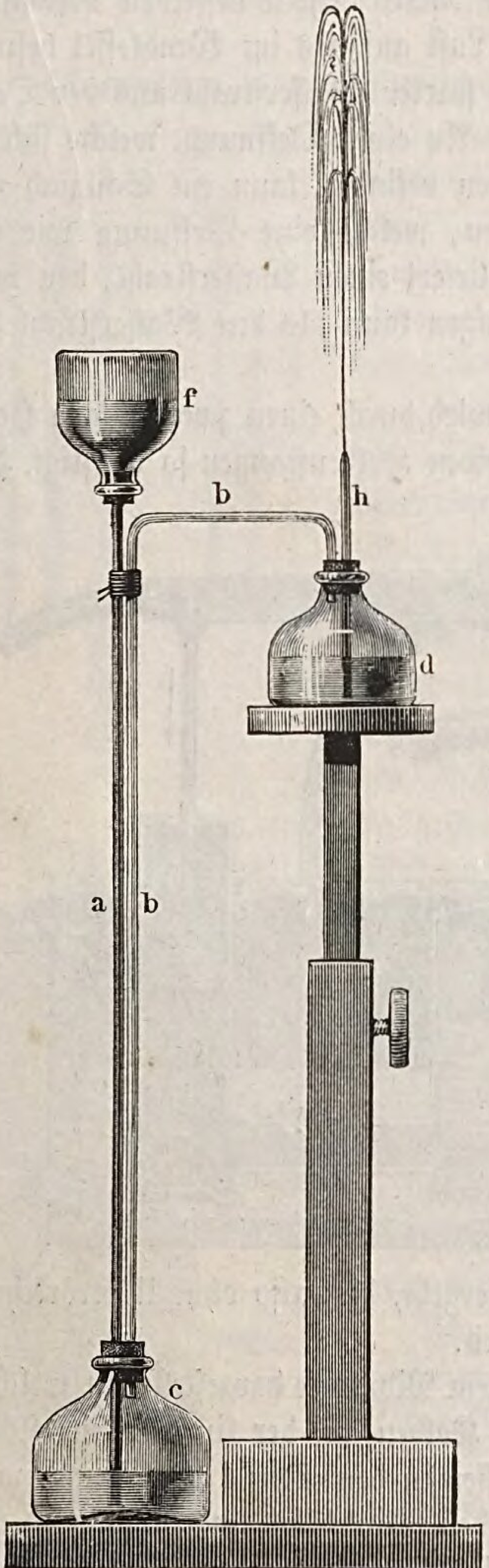
Fig. 137.



welche bei *a* zu einer feinen Spitze ausgezogen ist, geht luftdicht durch den Kork, welcher den Hals eines Glasballons verschließt, und zwar geht sie fast bis auf den Boden des zum Theil mit Wasser gefüllten Gefäßes herab. Wenn nun

durch ein zweites Rohr *df*, welches dicht unter dem Korke mündet, Luft eingeblasen wird, so wird dadurch die Luft im oberen Theil des Ballons comprimirt und durch ihren Druck ein Wasserstrahl aus der Oeffnung der Röhre *bca* hervorgetrieben.

Fig. 138.



Durch Blasen mit dem Munde kann man natürlich keine starke Compression im Ballon bewirken und also nur einen schwachen Wasserstrahl hervortreiben. Wenn es sich um die Erzeugung eines kräftigen Wasserstrahls auf diesem Wege handelt, muß man die Zusammendrückung der Luft durch eine Compressionspumpe besorgen und der größeren Festigkeit wegen Metallgefäße anwenden. Einen derartigen Heronsball stellt Fig. 137 dar. Nachdem das Gefäß etwas über die Hälfte mit Wasser gefüllt und das Spritzrohr eingeschraubt ist, wird die Ausflußspitze entfernt und dann der Apparat auf eine Compressionspumpe aufgeschraubt, mit Hülfe deren man so viel Luft einpumpt, daß der Druck derselben 2 bis 4 Atmosphären beträgt. Nun wird ein Hahn, welcher in dem Spritzrohre angebracht ist, geschlossen, und nachdem der Apparat von der Compressionspumpe entfernt ist, die Ausflußspitze wieder auf das Spritzrohr aufgeschraubt. Ein kräftiger Wasserstrahl entsteigt dem Spritzrohr, sobald man den Hahn öffnet.

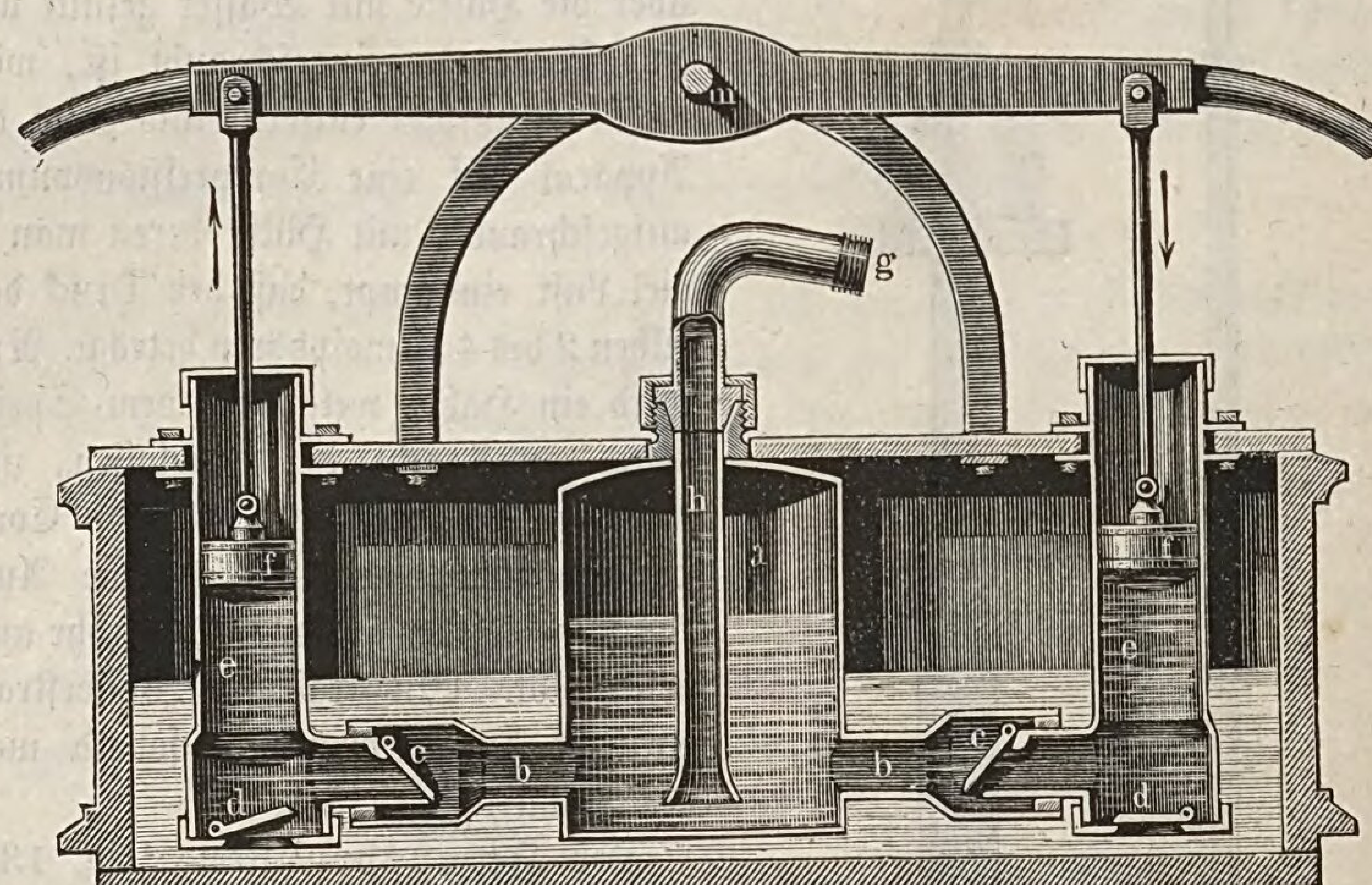
Der **Heronsbrunnen**, Fig. 138, ist ein Heronsball, in welchem die Luft durch den Druck einer Wassersäule comprimirt wird.

Die Feuerspritze, Fig. 139 (a. f. S.) ist eine Verbindung der Druckpumpe mit dem Heronsball. Die Pumpenstiefel, von denen wir vor der Hand nur den einen rechts betrachten wollen, stehen in einem mit Wasser gefüllten Kasten. Wenn der Kolben *f* aufgezogen wird, so hebt sich die Klappe *d*, und das Wasser dringt in den Stiefel. Beim Niedergange des Kolbens schließt sich das Ventil *d*, die Klappe *c* wird geöffnet und das Wasser wird durch das Gurgelrohr *b* in 62

den **Windkessel** *a* gepreßt. Dieser Windkessel ist nichts Anderes als ein großer Heronsball, dessen Steigrohr *h* fast bis auf seinen Boden reicht und bei *g* mit einem Gewinde versehen ist, an welches eine Röhre mit enger Oeffnung, der **Schwanenhals**, angeschraubt wird. Je mehr Wasser in den Windkessel gepumpt wird, desto mehr wird die Luft im oberen Theile desselben verdichtet. Durch den Druck, welchen diese verdichtete Luft auf das im Windkessel befindliche Wasser fortwährend ausübt, wird ein starker Wasserstrahl aus der Oeffnung des Schwanenhalses hervorgetrieben. An einer Oeffnung, welche sich in der Wand des Windkessels nahe am Boden befindet, kann ein Schlauch mit einer metallenen Spitze angeschraubt werden, welche eine Oeffnung wie der Schwanenhals hat; auch dieser Schlauch liefert einen Wasserstrahl, den man leichter lenken und der Feuerstelle näher bringen kann als den Wasserstrahl des Schwanenhalses.

Der Auf- und Niedergang der Kolben wird durch einen zweiarmigen Hebel bewerkstelligt. An diesem Hebel sind die beiden Kolbenstangen so befestigt, daß

Fig. 139.



der eine Kolben steigt, wenn der andere niedergeht, daß also ohne Unterbrechung dem Windkessel neues Wasser zugeführt wird.

In unserer Figur ist die Spritze in einem Momente dargestellt, in welchem der Kolben rechts niedergeht, während der Kolben auf der linken Seite steigt; auf der linken Seite wird also gerade Wasser in den Stiefel eingesaugt, während auf der rechten Seite eben Wasser in den Windkessel eingepreßt wird.

Es ist nicht gerade nothwendig, daß eine Feuerspritze zwei Cylinder habe, und in der That werden kleinere Feuerspritzen nur mit einem Cylinder construirt; in diesem Falle ist freilich der Wasserzugang in den Kessel alternirend, dessenungeachtet aber wird aus dem Rohre des Windkessels ein continuirlicher Wasserstrahl hinausgetrieben, weil die comprimirte Luft auch noch wirkt, während der Kolben aufgezogen wird. Es finden dabei allerdings Schwankungen in

der Kraft Statt, mit welcher der Wasserstrahl hervordringt; denn diese nimmt allmälig ab, während der Kolben aufgezogen wird, und sie wächst dann wieder, während der Kolben niedergedrückt, also eine neue Quantität Wasser in den Windkessel hineingepreßt wird. Doch sind diese Schwankungen um so kleiner, je größer der Inhalt des Windkessels im Vergleich mit dem des Cylinders ist.

Messung des Druckes eingeschlossener Gase. Solche 63

Fig. 140.

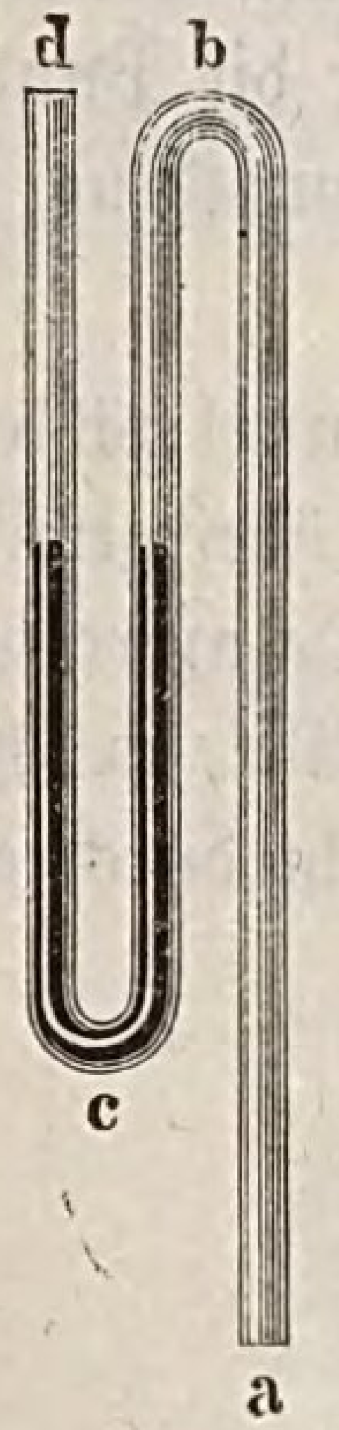
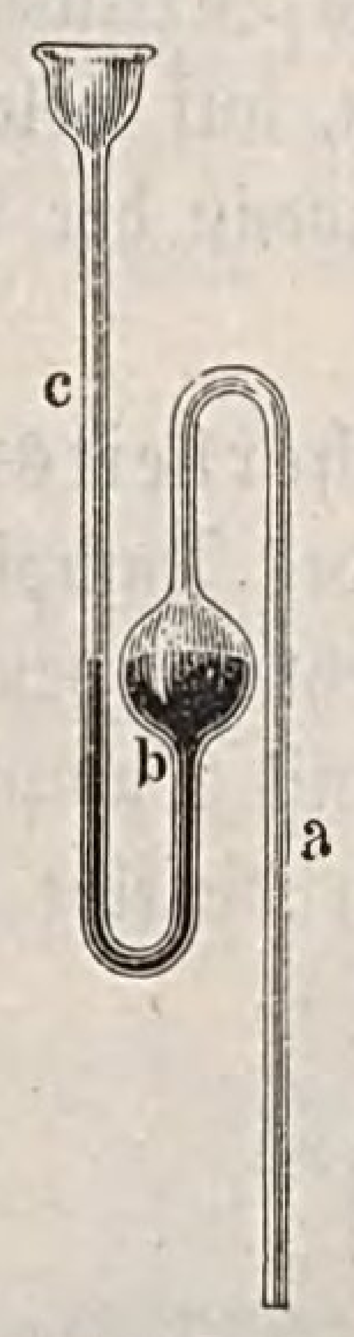


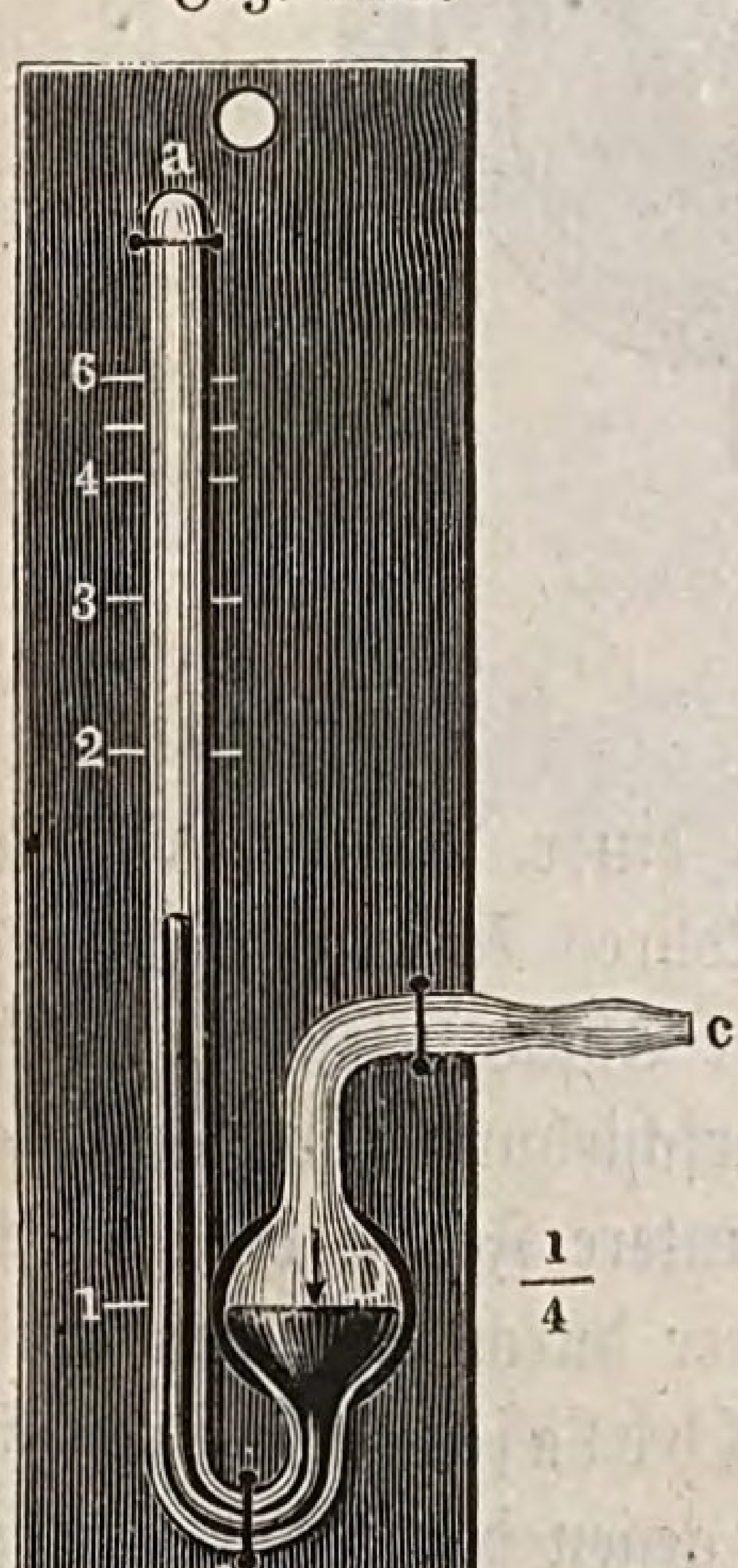
Fig. 141.



Apparate, die dazu dienen, den Druck zu messen, welchen in irgend einem abgesperrten Raume befindliche Gase auszuhalten haben, werden mit dem gemeinschaftlichen Namen der Manometer bezeichnet. Die Barometerprobe der Luftpumpen gehört also auch zu den Manometern.

In Fällen, wo der zu messende Druck nur gering ist, wendet man für den fraglichen Zweck Flüssigkeitssäulen an, welche in doppelt gebogenen Glasröhren, Fig. 140, enthalten sind. Das eine Ende *a* des Manometerrohres wird mittelst eines Korkes in einer entsprechenden Oeffnung des Glasbehälters eingesetzt oder mittelst einer Messingfassung auf dieselbe aufgeschraubt. Ist nun der Druck des Gases auf den Gipfel der Flüssigkeitssäule im mittleren Schenkel *bc* größer als der Druck der Atmosphäre auf den Gipfel der Flüssigkeitssäule im äußeren Schenkel *cd*, so wird sich natürlich die Flüssigkeit im äußeren Schenkel *cd* höher stellen müssen als im innern. Aus der Höhendifferenz der beiden unten communicirenden Flüssigkeitssäulen kann man dann auf die Größe des Druckes schließen, unter welchem das eingeschlossene Gas steht.

Fig. 142.



Bei schwächerem Druck dient Wasser als Sperrungsflüssigkeit, welches aber durch Quecksilber ersetzt wird, wenn der Druck stärker wird.

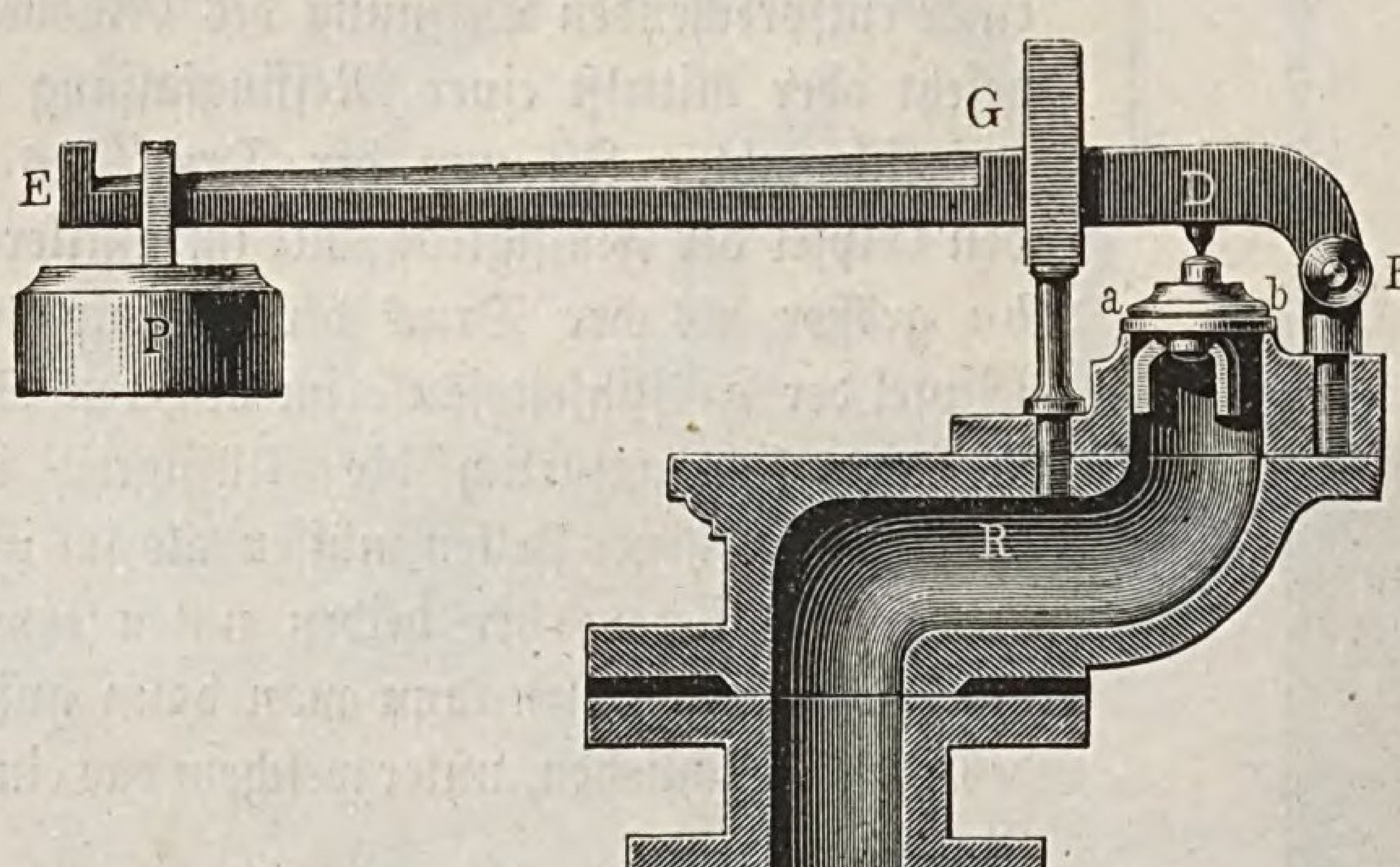
Fig. 141 zeigt eine andere Form der eben besprochenen Manometer, welche unter dem Namen der Welter'schen Sicherheitsröhre bei chemischen Arbeiten oft angewendet wird.

Wenn der Druck des eingeschlossenen Gases oder Dampfes auf 2, 3, 4 rc. Atmosphären steigt, so reichen solche offene Manometer, wie wir sie bisher betrachtet haben, nicht mehr aus. In solchen Fällen kann man aber Luftmanometer anwenden, deren Wesen darin besteht, daß durch den zu messenden Druck das als Sperrungsflüssigkeit dienende Quecksilber nicht in eine oben offene, sondern in eine oben verschlossene, mit Luft

gefüllte Röhre hineingetrieben und somit der Druck vorzugsweise durch die Compression der im Manometerrohre abgesperrten Luft gemessen wird. Fig. 142 stellt ein Compressionsmanometer einfachster Form dar. Die Luft in der oben zugeschmolzenen Glasröhre *ab* ist durch Quecksilber abgesperrt, welches die Kugel *D* ohngefähr noch zur Hälfte füllt. Wird nun die Mündung *c* der Röhre mit dem Innern eines Dampfkessels oder einer Dampfleitung in Verbindung gebracht, so wirkt der Druck des Dampfes auf die freie Oberfläche des Quecksilbers in der Kugel *D* und preßt dasselbe in die Röhre *ba* hinein, wodurch die eingeschlossene Luft comprimirt wird. Das Brettchen, auf welchem das Glasrohr befestigt ist, ist mit einer Scala versehen, auf welcher die Punkte bezeichnet sind, bis zu welchen das Quecksilber steigt, wenn der Dampfdruck 2, 3, 4, 5 oder 6 Atmosphären beträgt.

Zu den Manometern kann man auch das Sicherheitsventil zählen, welches dazu dient, zu verhindern, daß die Spannkraft des Dampfes über gewisse Gränzen hinaus wachse. Das Rohr *R* (Fig. 143) steht mit dem Dampfraume des Kessels in Verbindung, so daß es sich gleichfalls mit Dampf füllt, welcher durch seine obere Oeffnung entweichen würde, wenn dieselbe nicht durch ein

Fig. 143.



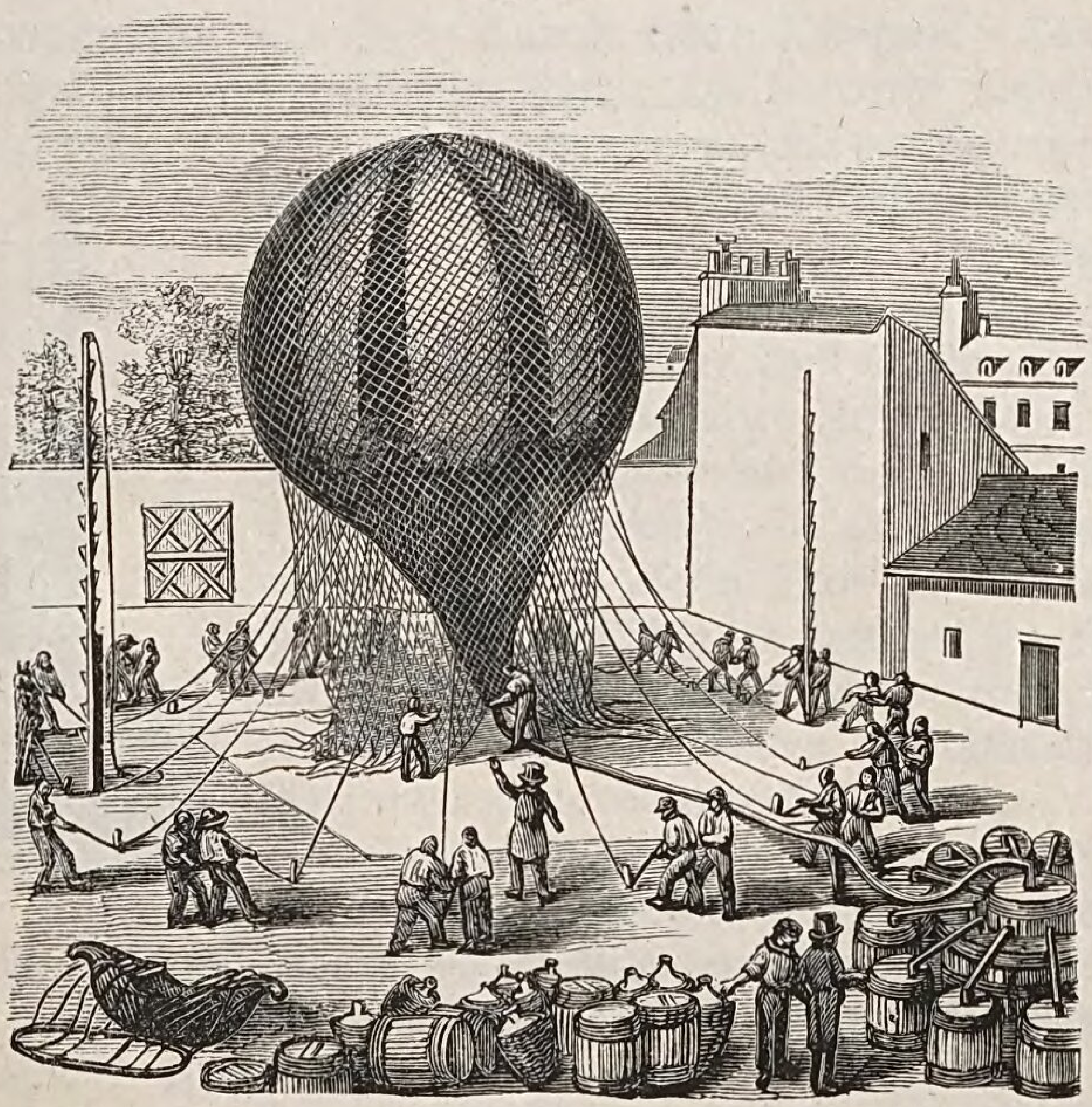
Ventil verschlossen wäre. Dieses Ventil besteht aus einer Metallplatte *ab*, welche auf den Rändern der oberen Oeffnung des Rohres *R* einfach aufliegt. An der unteren Fläche der Platte *ab* ist ein dreizinkiger Absatz befestigt, welcher genau in das Rohr *R* paßt und so eine seitliche Verschiebung der Platte *ab* verhindert. Während nun der Dampf gegen die untere Fläche des Ventils drückt und den Hebel *EF* zu heben sucht, wird letzterer durch das Gewicht *P* niedergedrückt. Eine Hebung des Ventils und ein Abblasen des Dampfes kann also erst erfolgen, wenn der Druck des Dampfes gegen das Ventil größer ist als die Belastung, welche es zu tragen hat.

64 **Der Luftballon.** Das archimedische Princip (S. 76) gilt für Gase wie für Flüssigkeiten; jeder Körper, welcher von Luft umgeben ist, verliert dem-

gemäß von seinem Gewichte so viel, als die verdrängte Luftmasse wiegt. Die Geltung des archimedischen Princips für Luft wird sehr gut durch den Apparat erläutert, welcher in Fig. 126 unter der Glocke der Luftpumpe steht und welcher den Namen Baroskop führt. An einem Wagbalken ist eine kleine Metallkugel mit einer hohlen Glaskugel ins Gleichgewicht gebracht; sobald die Glocke luftleer gepumpt wird, hört dieses Gleichgewicht auf; die Glaskugel sinkt, die kleine Metallkugel steigt. Die Erklärung dieses Versuchs hat wohl keine Schwierigkeit.

Ist ein Körper leichter als ein gleiches Volumen Luft, so muß er dem archimedischen Princip zufolge in der Luft steigen. Einen solchen Körper kann man herstellen, wenn man aus einer leichten Hülle einen Ballon macht und

Fig. 144.



diesen mit einem Gase füllt, welches leichter ist als atmosphärische Luft. Kleine Ballons der Art werden aus Goldschlägerhaut oder Collodium gefertigt, und mit Wasserstoffgas, welches 14mal leichter ist als atmosphärische Luft, oder mit Leuchtgas gefüllt. Ein so gefüllter Ballon steigt, wenn das eingeschlossene Gas sammt der Hülle und Allem, was daran hängt, weniger wiegt als ein gleiches Volumen atmosphärischer Luft.

Der Erfinder des Luftballons ist Montgolfier (1740 bis 1810), welcher denselben gleich in großem Maaßstabe ausführte. Sein Ballon war unten offen und wurde mit verdünnter Luft aufgeblasen, indem unterhalb der Oeffnung auf einem passenden Drahtnetz Papier oder Stroh verbrannt wurde.

Charles (1746 bis 1823) wandte zuerst Wasserstoffgas statt der warmen Luft zur Füllung der Luftballons an. Fig. 144 (a. v. S.) stellt die Füllung eines großen Luftballons mittelst Wasserstoffgas dar.

In neuerer Zeit wird an Orten, wo Gasbeleuchtung eingeführt ist, auch das Leuchtgas zur Füllung von Luftballons angewandt; da jedoch dieses Gas weit schwerer ist als Wasserstoffgas (sein specifisches Gewicht ist noch mehr als $1/2$ von dem der atmosphärischen Luft), so muß man größere Ballons anwenden, als es beim Wasserstoffgas nöthig ist.

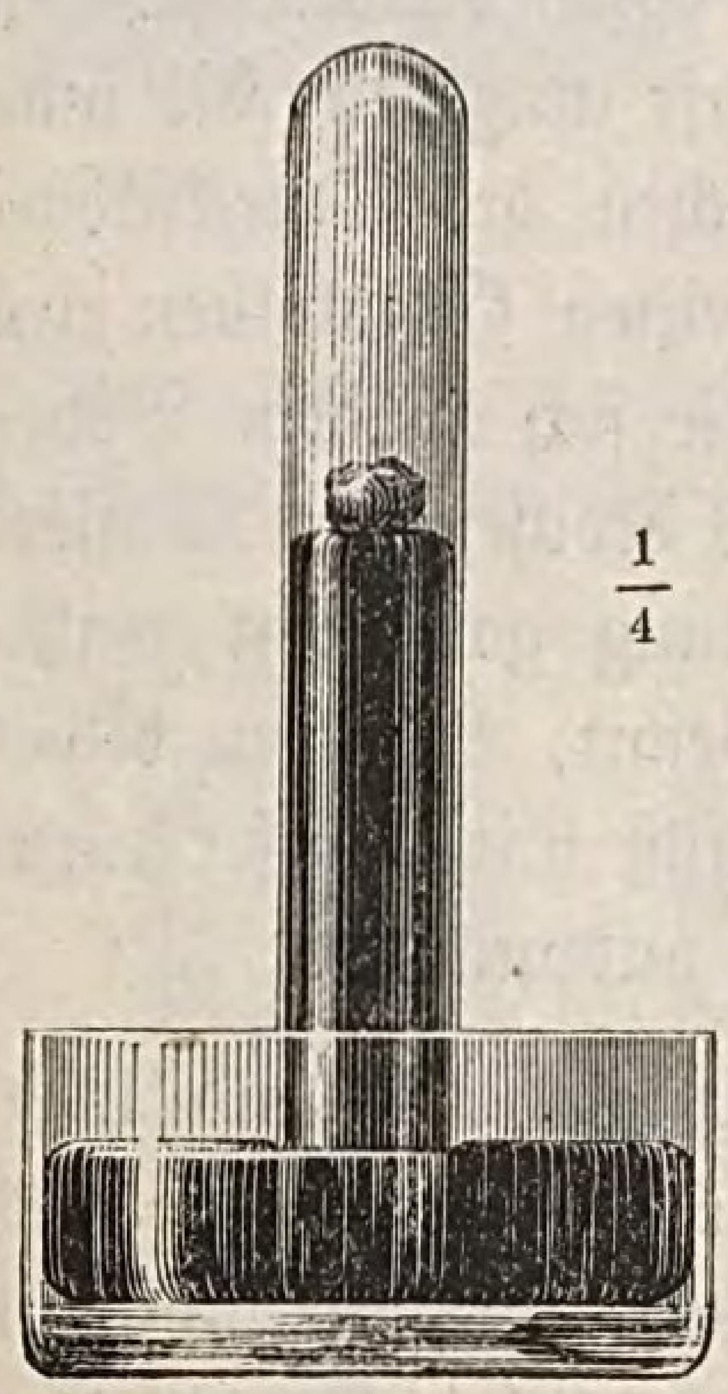
Seifenblasen, mit Wasserstoffgas oder Leuchtgas gefüllt, steigen gleichfalls.

Sechstes Capitel.

Anziehung zwischen gasförmigen und festen, sowie zwischen gasförmigen und flüssigen Körpern.

Absorption der Gase durch feste Körper. Daß zwischen 65
den Theilchen fester und gasförmiger Körper eine bedeutende Anziehung stattfindet, geht am augenscheinlichsten aus folgendem Versuche hervor. Bringt man ein Stück frisch ausgeglühter Holzkohle in einen Glascylinder, Fig. 145, welcher durch Quecksilber von der Verbindung mit der äußeren Luft abgesperrt, und dessen oberer Theil mit Ammoniakgas gefüllt ist, so wird nach kurzer Zeit das Gas von der Kohle dermaßen aufgenommen, daß das Quecksilber im Cylinder bis oben hinsteigt. Die ganze Masse des Gases, welches vorher den oberen Theil des Rohres erfüllte, ist jetzt durch die zwischen der Kohle und dem Gase stattfindende Anziehung in den Poren der Kohle verdichtet, das Gas ist absorbirt worden. Derselbe Versuch gelingt auch noch mit vielen anderen Gasen.

Fig. 145.



$\frac{1}{4}$

Wenn die Kohle längere Zeit an der Luft gelegen hat, so gelingt der Versuch weniger gut, was sehr begreiflich ist, wenn man bedenkt, daß die Kohle atmosphärische Luft und den in der Luft verbreiteten Wasserdampf absorbirt, wodurch natürlich ihre Absorptionsfähigkeit für andere Gase vermindert wird.

Wenn man eine Kohle, welche Gase absorbirt hat, unter die Glocke der Luftpumpe bringt oder glüht, so entweichen die absorbirten Gase wieder.

Die Absorption der Gase ist stets von einer Wärmeentwickelung begleitet, die um so bedeutender ist, je rascher die Absorption vor sich geht. Bei der Fabrikation des Schießpulvers wird Holzkohle zu einem sehr feinen Pulver zerrieben, welches die atmosphärische Luft mit solcher Begierde absorbirt, daß eine bedeutende, oft bis zur Entzündung steigende Erhitzung der Masse stattfindet.

Wenn ein feiner Strom von Wasserstoffgas auf einen Platinschwamm (fein vertheiltes Platin) geleitet wird, so erfolgt die Absorption des Gases mit solcher Heftigkeit, daß das Platin glühend wird und alsdann das Wasserstoffgas entzündet. Darauf gründet sich die Döbereiner'sche Zündmaschine.

Dadurch, daß sich der feste Körper in einem fein vertheilten Zustande befindet, wie dies beim Kohlenpulver und dem Platinschwamm der Fall ist, wird die Absorption bedeutend befördert, weil alsdann viele Berührungspunkte zwischen dem festen Körper und dem Gase vorhanden sind; doch ist dieser fein vertheilte poröse Zustand nicht durchaus nothwendig, um die Verdichtung der Gase zu bewirken, sie findet auch Statt, wenn der feste Körper eine vollkommen glatte Oberfläche hat, nur ist in diesem Falle die Verdichtung nicht so bedeutend. Wenn man ein Stück Platin mit vollkommen metallischer Oberfläche in ein Gemenge von Sauerstoffgas und Wasserstoffgas bringt, so werden die beiden Gase so sehr verdichtet, daß sie sich allmälig zu Wasser verbinden.

Nicht allein Platin und Kohle zeigen dieses merkwürdige Verhalten gegen Gase, sondern mehr oder weniger alle festen Körper. Jeder feste Körper ist daher gleichsam mit einer verdichteten Atmosphäre von irgend einem Gase umgeben, welche sich oft nur sehr schwer von ihm trennen läßt, und mit welcher sich der Körper, wenn man seine Oberfläche davon auch vollkommen befreit, nach einiger Zeit doch wieder umgiebt, wenn er in Berührung mit Gasen bleibt. So ist z. B. das Glas stets mit einer Hülle von verdichteter Luft umgeben, die man bei der Anfertigung von Barometern erst durch das Kochen des Quecksilbers in der Röhre entfernen kann. Gießt man Wasser in einen Glaskolben und bringt man ihn dann über Feuer, so sieht man bald, wie sich an dem Boden eine Menge kleiner Bläschen bilden, noch lange ehe das Kochen des Wassers beginnt. Es ist die vorher wegen ihrer großen Verdichtung gar nicht wahrgenommene Luftschicht, die nun, durch die Wärme ausgedehnt, Bläschen bildet. Aehnliche Bläschen sieht man auch, wenn man ein Gefäß mit Wasser unter den Recipienten der Luftpumpe bringt und letzteren dann auspumpt.

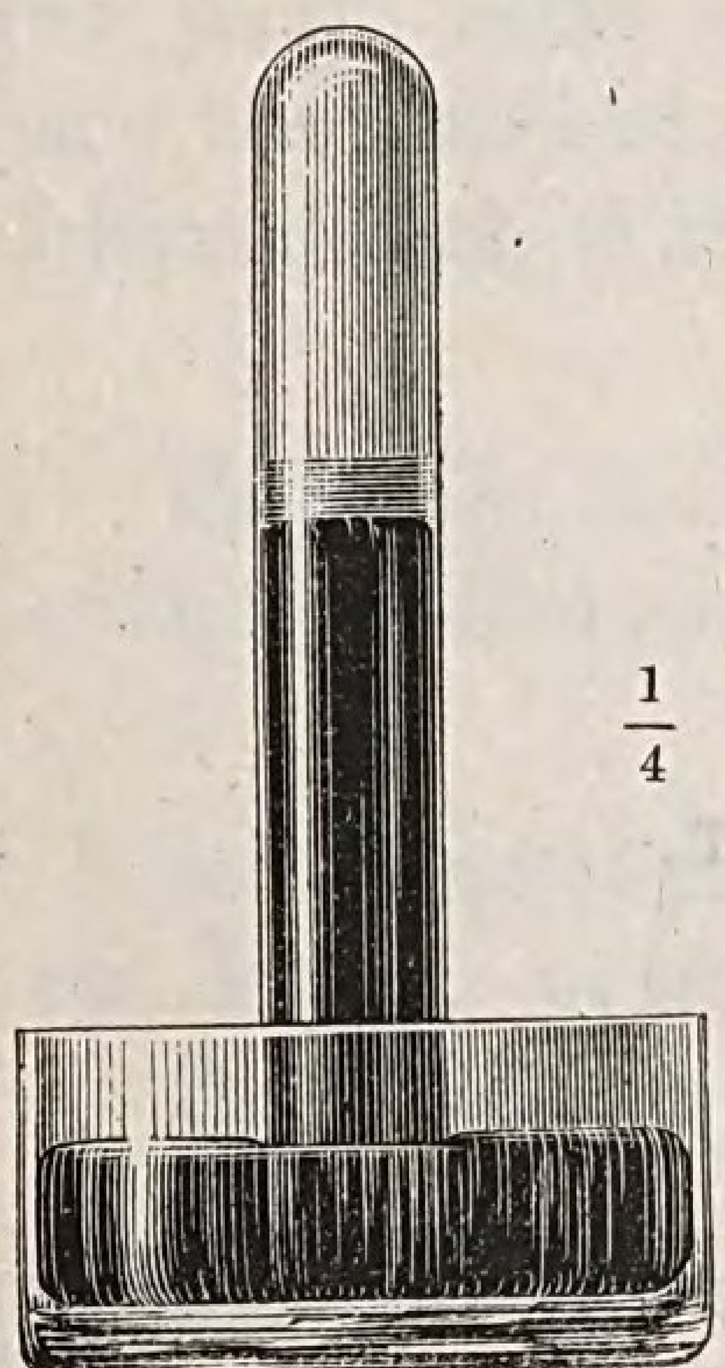
Solche gasförmige Körper, die leicht in den flüssigen Zustand übergehen (Dämpfe), werden durch die Anziehung, welche feste Körper auf sie ausüben, flüssig gemacht. So zieht z. B. Chlorcalcium den Wasserdampf mit großer Begierde an, verdichtet ihn zu Wasser und zerfließt endlich in dem Wasser. Auch das Kochsalz zieht den Wasserdampf aus der Luft an und wird feucht; ebenso verhalten sich die Pottasche und viele andere Körper.

Körper, welche den Wasserdampf aus der Luft anziehen, heißen *hygroskopische Körper*. Außer den schon angeführten sind auch Holz, Haare, Fischbein u. s. w. hygroskopisch.

66 **Absorption der Gase durch Flüssigkeiten.** Flüssigkeiten zeigen gegen Gase ein ganz ähnliches Verhalten, wie das, welches wir soeben bei den festen Körpern betrachtet haben. Man kann dies recht anschaulich machen, wenn man den auf Seite 125 angeführten Versuch in der Weise abändert, daß man statt der Kohle Wasser in die Röhre bringt, wie in Fig. 146 angedeutet ist. Das Ammoniakgas wird von dem Wasser mit solcher Begierde absorbirt, daß alsbald alles Gas verschwindet und die ganze Röhre sich mit Flüssigkeit füllt.

Das Wasser absorbirt ein 700 faches Volumen Ammoniakgas und ein 500 faches Volumen Salzsäuregas.

Fig. 146.



1/4

Das Absorptionsvermögen der Flüssigkeiten hängt von der Temperatur und dem Drucke der Gase ab, und zwar ist es letzterem proportional, so daß unter einem Drucke von 2, 3 u. s. w. Atmosphären dem Gewichte nach zweimal, dreimal so viel von einem bestimmten Gase absorbirt wird, als unter dem gewöhnlichen Luftdruck.

Mit steigender Temperatur nimmt das Absorptionsvermögen ab.

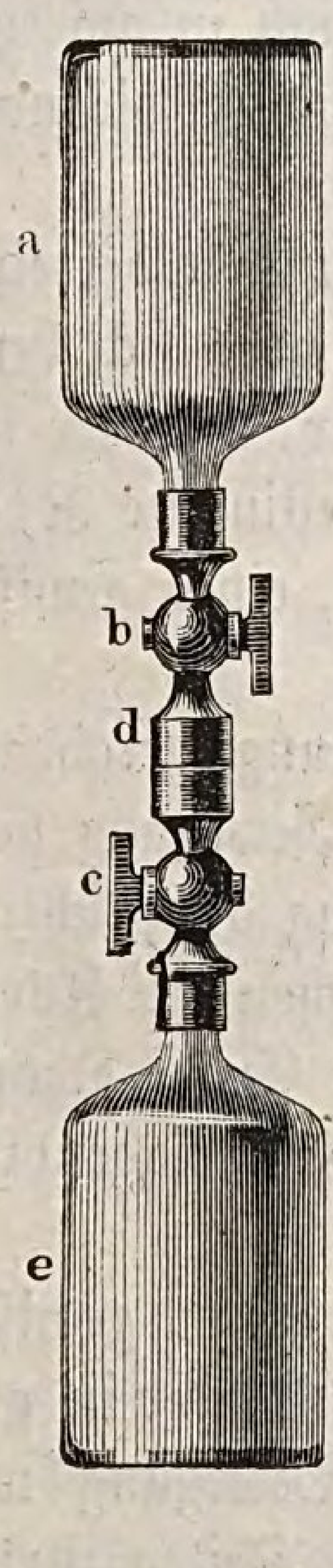
Das Wasser enthält fast immer eine ziemlich bedeutende Menge absorbirter Luft und kann davon nur durch längeres Kochen befreit werden.

Nach den genauesten Versuchen absorbirt 1 Volumen Wasser bei 0⁰ und 760 mm Quecksilberdruck.

0,024	Volumina	atmospärische Luft,
0,020	„	Stickstoff,
0,041	„	Sauerstoff,
1,797	„	Kohlensäure.

Schaumwein und Sauerwasser sind Flüssigkeiten, welche unter höherem Druck Kohlensäure absorbirt haben, die zum Theil entweicht, wenn der Druck nachläßt.

Fig. 147.



Diffusion der Gase. Eine ähnliche Erscheinung, 67
wie wir sie in §. 50 für tropfbar flüssige Körper kennen gelernt haben, findet auch zwischen verschiedenen Gasen Statt, und zwar tritt die Erscheinung der Diffusion für *alle Gase* ein, während nicht alle Flüssigkeiten in einander diffundiren.

Werden zwei Gasballons, deren Hals durch einen Hahn verschlossen werden kann und von denen der eine mit *Wasserstoffgas*, der andere mit *Kohlensäure* gefüllt ist, so zusammengeschraubt, wie Fig. 147 zeigt, und dann so aufgestellt, daß der Ballon mit der Kohlensäure der untere ist, so findet man nach einiger Zeit, wenn durch Oeffnen der beiden Hähne die beiden Ballons in Communication gesetzt worden sind, daß sich sowohl die Kohlensäure als auch das Wasserstoffgas in beiden Ballons gleichförmig vertheilt haben, so daß trotz des größeren specifischen Gewichtes die Hälfte der Kohlensäure in den oberen Ballon gestiegen und die Hälfte des Wasserstoffgases in den unteren herabgesunken ist.

Die bis auf unbedeutende Schwankungen im Kohlensäuregehalt überall ganz gleiche Zusammensetzung der atmosphärischen Luft ist eine Folge der *Diffusion der Gase*.

Siebentes Capitel.

Bewegung fester Körper.

68 **Grundbegriffe.** Jeder Körper nimmt im Raume einen gewissen Ort ein und kann in diesem Orte entweder bleiben, oder aus demselben nach und nach in andere Orte übergehen. Im ersten Falle sagt man, der Körper befinde sich in Ruhe, im anderen Falle, er befinde sich in Bewegung. Ruhe und Bewegung eines Körpers sind entweder absolut, oder relativ, je nachdem man den Ort desselben auf einen Raum bezieht, der entweder selbst in Ruhe, oder in Bewegung ist. So sind die Theile einer Landschaft in relativer Ruhe in Bezug auf die Erde; aber sie sind deshalb nicht auch in absoluter Ruhe; denn sie durchlaufen mit der Erde, auf der sie sich befinden, die ungeheure Bahn dieses Planeten.

Die Aufeinanderfolge der Orte, welche ein Körper durchläuft, bildet einen Raum, den man die Bahn des Körpers nennt. Die Bahn eines sich bewegenden Punktes ist eine Linie. In seiner Bahn hat der Körper, den wir uns der Einfachheit wegen immer als Punkt denken wollen, eine bestimmte Richtung und legt in der Zeit, während welcher er sich bewegt, einen gewissen Weg zurück.

In Bezug auf die Richtung nennt man eine Bewegung geradlinig, wenn sich der Körper stets in derselben Richtung bewegt; die Bewegung heißt dagegen krummlinig, wenn der Körper bei seiner Bewegung die Richtung stetig ändert. Wenn man sich in dem Punkte der Curve, welchen der Körper in einem bestimmten Momente einnimmt, eine Tangente an die Curve gezogen denkt, so giebt diese Tangente die Richtung an, welche in diesem Augenblicke die Bewegung des Körpers hat.

In Bezug auf die Zeit, während welcher der Körper einen gewissen Weg zurücklegt, heißt die Bewegung gleichförmig, wenn der Körper in gleichen Zeiten auch gleiche Wege zurücklegt; dagegen wird die Bewegung ungleichförmig genannt, wenn die von dem Körper in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege ungleich sind. Da jede Bewegung sich nur stetig ändert, so

kann man jede ungleichförmige Bewegung während eines sehr kleinen Zeittheilchens als gleichförmig betrachten.

Bei der gleichförmigen Bewegung versteht man unter Geschwindigkeit das Verhältniß des Weges, welchen der Körper zurücklegt, zur Zeit, welche er zu dieser Zurücklegung gebraucht. Bezeichnet man also mit s den durchlaufenen Weg, mit t die dazu gebrauchte Zeit und mit c die Geschwindigkeit, so ist:

$$c = s : t \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Setzt man in dieser Gleichung $t = 1$, so ist auch s der in der Zeiteinheit zurückgelegte Weg und die Gleichung 1) geht über in

$$c = s,$$

d. h. bei gleichförmiger Bewegung ist die Geschwindigkeit gleich dem Wege, welcher in der Zeiteinheit zurückgelegt wird.

Aus Gleichung 1) ergiebt sich ferner:

$$s = c \,.\, t \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

d. h. bei gleichförmiger Bewegung findet man den zurückgelegten Weg, wenn man die Zeit, welche zur Zurücklegung erforderlich ist, mit der Geschwindigkeit multiplicirt.

Aus derselben Gleichung ergiebt sich endlich noch:

$$t = s : c \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

d. h. bei gleichförmiger Bewegung findet man die Bewegungsdauer, wenn man den zurückgelegten Weg durch die Geschwindigkeit dividirt.

Der Zahlenwerth der Geschwindigkeit für einen speciellen Fall hängt davon ab, welche Einheiten man für Zeit und Weg zu Grunde legt. Meist wählt man die Secunde zur Zeiteinheit und das Meter zur Längeneinheit. Ein ausgewachsener Mensch geht z. B. mit einer Geschwindigkeit von 0,75 m, ein Schnellzug fährt auf der Eisenbahn mit einer Geschwindigkeit von 12 m in der Secunde.

Da die ungleichförmige Bewegung während eines sehr kleinen Zeittheilchens als gleichförmig betrachtet werden kann, so versteht man bei ihr unter der Geschwindigkeit, welche der Körper in einem bestimmten Zeitpunkte hat, das Verhältniß des kleinen Wegtheilchens, welches der Körper zurücklegt, zu dem sehr kleinen Zeittheilchen, welches der Körper zur Zurücklegung gebraucht. Bezeichnet man daher mit σ das durchlaufene Wegtheilchen, mit τ das dazu erforderliche Zeittheilchen und mit v die Geschwindigkeit, so ist

$$v = \sigma : \tau \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

Würde die Bewegung während einer Secunde gleichförmig bleiben, so würde auch die vorstehende Gleichung gültig sein, wenn man $\tau = 1$ setzte; dann aber wäre σ der in der Secunde zurückgelegte Weg und die Gleichung 4) ginge über in

$$v = \sigma,$$

d. h. bei ungleichförmiger Bewegung ist die Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitpunkte gleich dem Wege, welchen der Körper in der folgenden Secunde zurücklegen würde, wenn die Bewegung während dieser Zeit gleichförmig bliebe. Hat also ein Körper, der sich in ungleichförmiger Bewegung befindet, in irgend einem Zeitpunkte eine Geschwindigkeit von 10 m, so heißt dies, der Körper würde in jeder folgenden Secunde 10 m zurücklegen, wenn sein Bewegungszustand unverändert bliebe.

Die ungleichförmige Bewegung ist entweder beschleunigt, oder verzögert, je nachdem die Geschwindigkeit zu-, oder abnimmt. Nimmt die Geschwindigkeit in gleichen Zeiten um gleich viel zu, oder ab, so heißt die Bewegung gleichförmig beschleunigt, oder gleichförmig verzögert; die secundliche Geschwindigkeitszunahme wird dann Beschleunigung, die secundliche Geschwindigkeitsabnahme aber Verzögerung genannt.

Erst Galiläi kann als Begründer der Bewegungslehre bezeichnet werden. Das erste Gesetz der Bewegung, welches er aufstellte, ist dasjenige, welches gewöhnlich als Gesetz der Trägheit bezeichnet wird. Nach diesem Gesetz muß sich ein Körper, welcher einmal in Bewegung ist, in gerader Linie und mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegen, so lange keinerlei Kräfte auf ihn einwirken.

Die richtige Erkenntniß dieses Gesetzes war in der That nicht leicht, weil in der Natur eine geradlinige, gleichförmige Bewegung nicht vorkommt und wir nicht im Stande sind, einen bewegten Körper längere Zeit hindurch dem Einflusse von bewegenden Kräften und Bewegungswiderständen zu entziehen. Bei allen Bewegungen, welche man zu beobachten Gelegenheit hat, tritt also nie die Wirkung der Trägheit rein für sich, sondern stets modificirt durch bewegende Kräfte und Bewegungswiderstände auf; es galt daher, die Trägheit in diesen Combinationen zu erkennen und sie bei allen in der Wirklichkeit vorkommenden Bewegungen nachzuweisen, wie dies Galiläi in der That beim freien Fall, bei der Wurfbewegung u. s. w. gethan hat.

Das zweite von Galiläi aufgestellte Gesetz lautet: Jede Kraft, welche auf einen beweglichen Körper wirkt, ertheilt diesem in ihrer Richtung eine Beschleunigung, welche der Kraft direct und der Masse indirect proportional ist. Die Beschleunigung wird zur Verzögerung, wenn der Körper schon eine Bewegung besitzt und die Kraft dieser Bewegung entgegenwirkt.

Da wir bis jetzt ein Maaß für die Masse nicht festgestellt haben und somit noch frei darüber verfügen können, so nehmen wir diejenige Masse als Einheit an, welche durch die Kraft von 1 kg die Beschleunigung von 1 m erhält. Nach dem zweiten Galiläi'schen Gesetze ertheilt alsdann eine Kraft von P Kilogramm der Masseneinheit eine Beschleunigung von p Metern und eine Kraft von P Kilogramm der Masse M eine Beschleunigung von $P : M$

Metern. Bezeichnet man daher allgemein die Beschleunigung, welche eine Kraft P der Masse M ertheilt, mit p, so ist

$$p = \frac{P}{M}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

d. h. man findet die Beschleunigung, wenn man die Kraft durch die Masse dividirt.

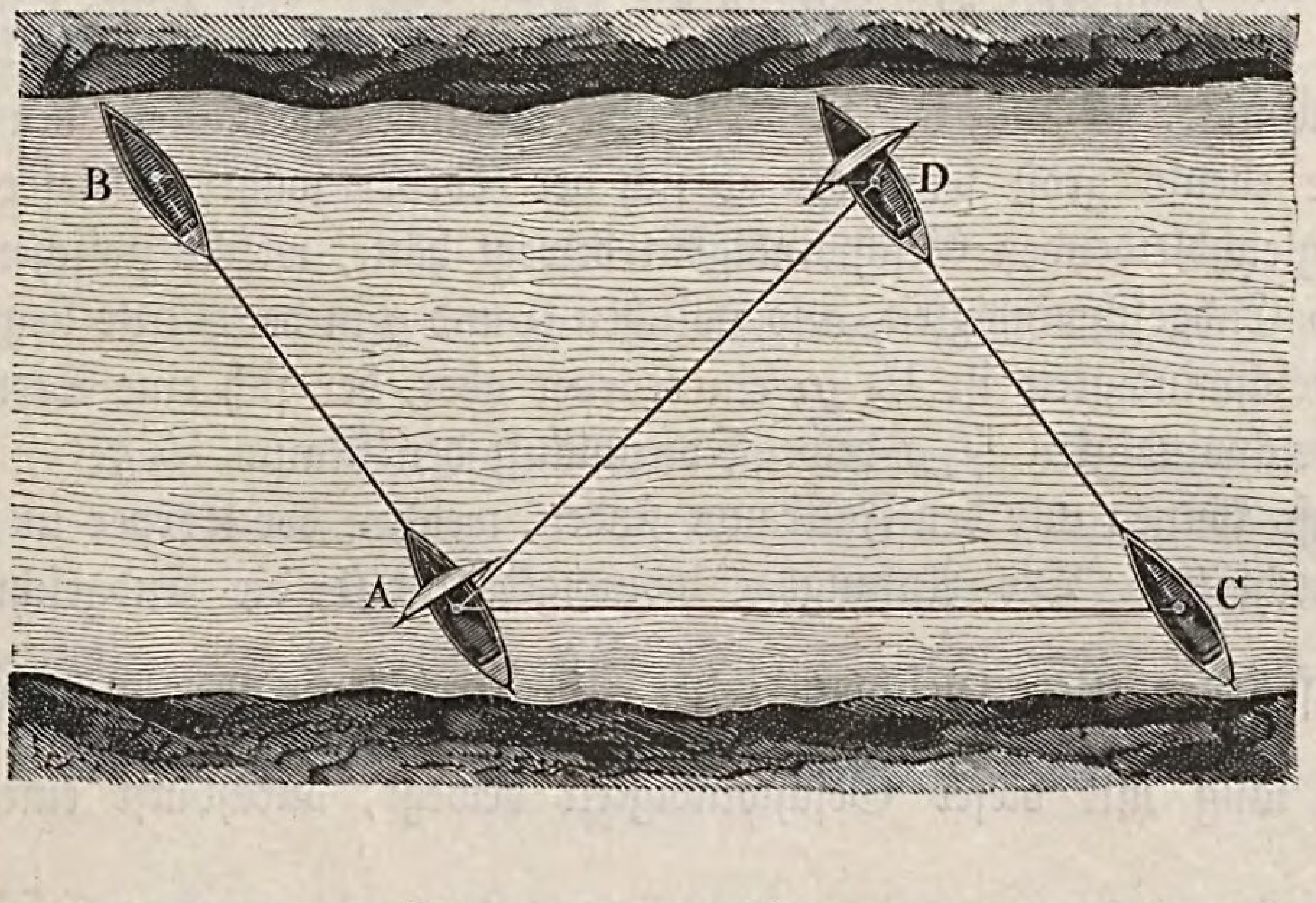
Aus vorstehender Gleichung ergiebt sich noch

$$P = Mp \text{ und } M = \frac{P}{p}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

d. h. man findet die Kraft, wenn man die Masse mit der Beschleunigung multiplicirt und man findet die Masse, wenn man die Kraft durch die Beschleunigung dividirt.

Das dritte Gesetz, welches Galiläi aufstellte, heißt: Entsteht die Bewegung eines Körpers durch das Zusammenwirken zweier Bewegungen, so ist der Weg der resultirenden Bewegung gleich der Summe der Einzelwege, wenn diese übereinstimmende Richtung haben; dagegen ist derselbe gleich der Differenz der Einzelwege, wenn diese von entgegengesetzter Richtung sind. Bilden aber die Richtungen der Einzelwege AB und AC (Fig. 148) einen Winkel mit

Fig. 148.



einander, so gelangt der Körper vom Ausgangspunkte A nach dem gegenüberliegenden Eckpunkte D eines Parallelogrammes, dessen zwei andere Eckpunkte B und C diejenigen Orte sind, nach denen der Körper vermöge jeder einzelnen Bewegung gelangen würde. Dieses Gesetz, welches mit dem Satze vom Parallelogramm der Kräfte aufs innigste zusammenhängt, wird der Satz vom Parallelogramm der Bewegungen genannt.

69 **Die Fallgesetze.** Denken wir uns, daß die Schwerkraft, unter deren Einfluß ein Körper eine Zeit lang frei herabgefallen ist, in einem bestimmten Moment auf ihn zu wirken aufhöre, so würde deshalb der Körper nicht stillstehen, er würde sich vielmehr vermöge seiner Trägheit von nun an mit gleichbleibender Geschwindigkeit fortbewegen.

Da aber die Schwere in jedem Momente des Falles auf dieselbe Weise wirkt, so muß sie die Geschwindigkeit des fallenden Körpers in gleichen Zeiten auch gleichviel vermehren, d. h. die Bewegung muß eine gleichförmig beschleunigte sein. Angenommen nun die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers nehme in jeder Secunde um g Meter zu oder, was dasselbe ist, die Beschleunigung der Schwere sei g Meter, so beträgt die Geschwindigkeit des fallenden Körpers nach

1	2	3	4	.... t	Secunden
g	$2g$	$3g$	$4g$	.... tg	Meter.

Die Geschwindigkeit, welche der fallende Körper nach t Secunden erlangt hat, nennt man seine Endgeschwindigkeit; bezeichnet man dieselbe mit v, so ist also:

$$v = gt, \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

d. h. man findet die Endgeschwindigkeit eines fallenden Körpers, wenn man die Beschleunigung der Schwere mit der Fallzeit multiplicirt. Dies ist das erste Fallgesetz.

Welchen Raum wird aber der fallende Körper in 1, in 2, 3, 4 ... t Secunden durchlaufen? Zu Anfang der ersten Secunde ist seine Geschwindigkeit gleich 0, zu Ende derselben ist sie g. Da nun die Geschwindigkeit gleichförmig zunimmt, so muß der in der ersten Secunde durchfallene Raum offenbar gerade ebenso groß sein, als ob sich der Körper während dieser Secunde mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit bewegt hätte, welche zwischen der Anfangs- und Endgeschwindigkeit, also zwischen 0 und g in der Mitte liegt. Diese mittlere Geschwindigkeit ist $\frac{1}{2}g$; ein Körper aber, der sich eine Secunde lang mit der Geschwindigkeit $\frac{1}{2}g$ bewegt, durchläuft den Raum $\frac{1}{2}g$.

Ebenso können wir den Fallraum finden, welchen der Körper in zwei Secunden durchfällt. Die Anfangsgeschwindigkeit ist 0, die Endgeschwindigkeit $2g$, also ist die mittlere Geschwindigkeit $\frac{2g}{2}$; ein Körper aber, welcher sich zwei Secunden lang mit dieser Geschwindigkeit bewegt, durchläuft einen Raum $2 \cdot 2\frac{g}{2}$.

In drei Secunden durchfällt der Körper einen Raum $3 \cdot 3\frac{g}{2}$, denn die Anfangsgeschwindigkeit ist 0, die Endgeschwindigkeit $3g$, also die mittlere Geschwindigkeit $3\frac{g}{2}$; der fallende Körper legt somit in drei Secunden Fallzeit denselben Weg zurück, als ob er sich drei Secunden lang mit der Geschwin-

digkeit $3 . \frac{g}{2}$ bewegt hätte; der von ihm durchlaufene Fallraum beträgt daher $3 . 3 . \frac{g}{2}$.

Wir wollen diesen Schluß allgemein machen. Wenn ein Körper t Secunden lang fällt, so legt er einen Weg zurück, welcher demjenigen gleich ist, den er während derselben Zeit bei gleichförmiger Bewegung zurückgelegt hätte, wenn seine Geschwindigkeit das arithmetische Mittel zwischen der Anfangsgeschwindigkeit 0 und der Endgeschwindigkeit $g . t$, also $\frac{g}{2} t$ gewesen wäre. Ein Körper aber, welcher sich t Secunden lang mit der Geschwindigkeit $\frac{g}{2} t$ bewegt, durchläuft einen Raum

$$s = \frac{g}{2} . t^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

d. h. in Worten: man findet den Fallraum, wenn man die halbe Beschleunigung der Schwere mit dem Quadrat der Fallzeit multiplicirt. Dies ist das zweite Fallgesetz.

Für den freien Fall erhält man, wenn der Luftwiderstand nicht berücksichtigt wird, folgende zusammengehörende Werthe von t, v und s:

t	1	2	3	4	5	Secunden
v	10	20	30	40	50	Meter
s	5	20	45	80	125	Meter.

In dieser Tabelle ist angenommen, daß die Beschleunigung g der Schwere 10 m beträgt; ein genauerer Werth

$$g = 9{,}809 \text{ m}$$

ergiebt sich aus der Beobachtung von Pendelschwingungen, wie wir weiter unten sehen werden.

Es ist häufig von Wichtigkeit, aus den gegebenen Fallhöhen unmittelbar die entsprechende Geschwindigkeit berechnen zu können. Eine Formel, nach welcher diese Rechnung auszuführen ist, ergiebt sich aus den Gleichungen 1) und 2) durch Elimination von t. Erhebt man nämlich die Gleichung 1) ins Quadrat und dividirt durch Gleichung 2), so erhält man

$$v^2 = 2 g . s \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

d. h. das Quadrat der Endgeschwindigkeit eines fallenden Körpers ist gleich dem doppelten Rechteck aus der Beschleunigung der Schwere und dem Fallraum. Dies ist das dritte Fallgesetz.

Wäre z. B. ein Körper 30 m hoch herabgefallen, so ist nach Gleichung 3) die Endgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{2 . 9{,}8 . 30} = 24{,}24 \, . \, . \text{ Meter}$$

(natürlich ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes).

Da beim freien Fall das Gewicht des fallenden Körpers die bewegende Kraft ist, so ist, wenn dasselbe mit G, die Masse des Körpers mit M und die Beschleunigung der Schwere, wie bisher, mit g bezeichnet wird, nach Gleichung 6, Seite 131:

$$M = \frac{G}{g} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

d. h. man findet die Masse eines Körpers, wenn man sein Gewicht durch die Beschleunigung der Schwere dividirt.

Die drei Gesetze, welche über den freien Fall aufgestellt wurden, gelten nicht allein für diesen, sondern auch für jede andere gleichförmig beschleunigte Bewegung. Ist für eine solche die Beschleunigung gleich p, so hat man in den Gleichungen 1), 2) und 3) statt der Beschleunigung g der Schwere nur die Größe p einzusetzen, um den Zusammenhang der Größen v, p, t und s zu finden. Man erhält so die Gleichungen

$$v = pt, \quad s = \frac{1}{2} pt^2 \text{ und } v^2 = 2ps,$$

welche wohl keiner weiteren Erklärung bedürfen.

Fall auf der schiefen Ebene. Ein Körper, welcher über die Länge der schiefen Ebene herabrollt oder herabgleitet erfährt eine Beschleunigung, welche gleich ist dem Producte aus der Beschleunigung der Schwere mit dem Sinus des Neigungswinkels der schiefen Ebene. Bezeichnet man nämlich das Gewicht des Körpers mit G und den Neigungswinkel der schiefen Ebene mit x, so ist nach §. 22 Seite 41 die Kraft P, mit welcher der Körper über die schiefe Ebene herabgetrieben wird:

$$P = G \sin x.$$

Bezeichnet man ferner die Masse des Körpers mit M, so ist die Beschleunigung p auf der schiefen Ebene nach Gleichung 5), Seite 131:

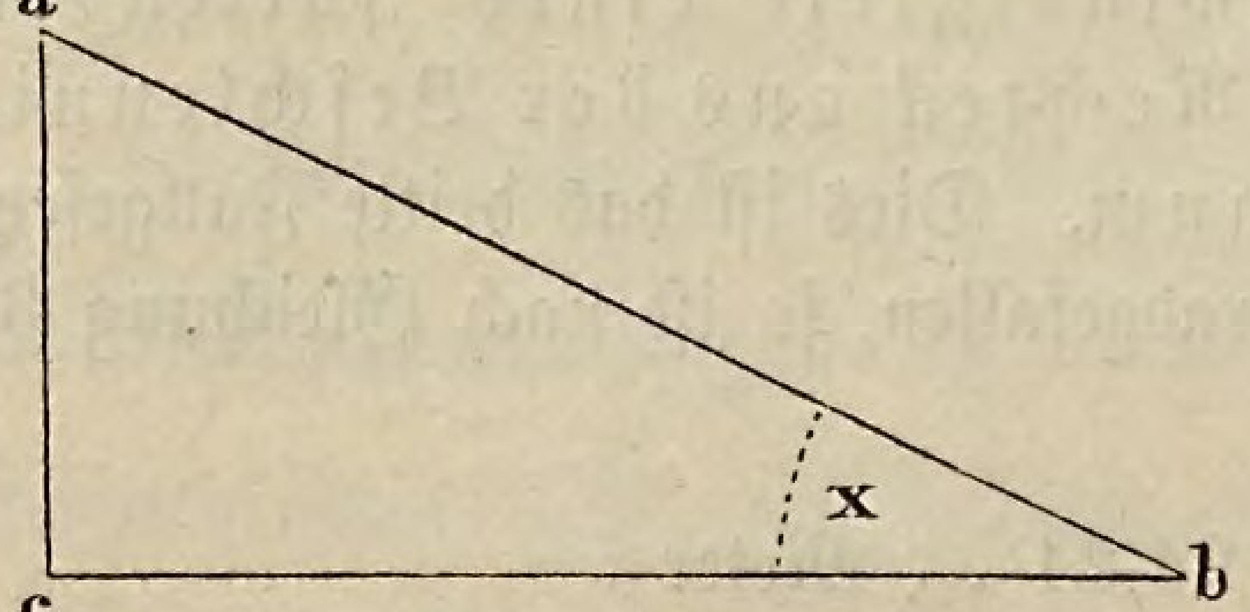
$$p = \frac{P}{M} = \frac{G}{M} \sin x.$$

Hieraus aber ergiebt sich, wenn man bedenkt, daß nach Gleichung 4) der Quotient aus Gewicht durch die Masse gleich der Beschleunigung g der Schwere ist,

$$p = g \sin x.$$

Wenn ein Körper über die ganze Länge der schiefen Ebene herabrollt, so erlangt er dieselbe Geschwindigkeit (vorausgesetzt daß keine Reibung und kein Luftwiderstand stattfindet) als wenn er die Höhendifferenz zwischen a und b, also die Höhe ac frei durchfallen hätte.

Fig. 149.



Es ist dies leicht zu beweisen aus dem Satze: das Quadrat der Endgeschwindigkeit ist gleich dem doppelten

Rechtecke aus der Beschleunigung mit dem zurückgelegten Wege. Bezeichnen wir die Länge *ab* der schiefen Ebene mit *l*, und den Winkel, welchen sie mit der Horizontalen bildet mit *x*, so ist das Quadrat der Geschwindigkeit *V*, mit welcher ein von *a* aus auf der schiefen Ebene herabrollender Körper in *b* ankommt

$$V^2 = 2\, gl \sin x;$$

das Quadrat der Geschwindigkeit *v* aber, mit welcher ein von *a* vertical herabfallender Körper in *c* ankommt, ist

$$v^2 = 2 gs,$$

wenn *s* die verticale Höhe *ac* bezeichnet. Nun ist aber $s = l . \sin x$; setzen wir diesen Werth von *s* in die Gleichung ein, so kommt auch

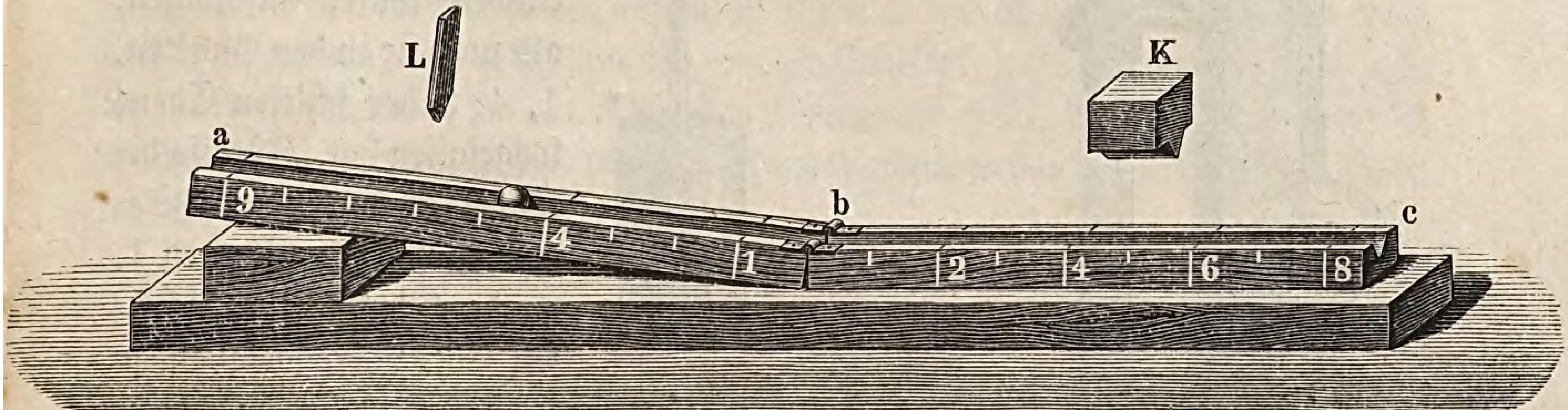
$$v^2 = 2\, gl \sin x,$$

also in der That $V = v$.

Versuche über das Fallgesetz. Für den freien Fall sind die selbst in den ersten Secunden durchfallenen Räume viel zu groß, als daß man ihn zur Bestätigung des Fallgesetzes gebrauchen könnte, und zwar ist dies um so weniger möglich, als eben der großen Geschwindigkeit wegen der Widerstand der Luft bedeutende Störungen veranlaßt. 70

Galiläi studirte zuerst die Fallgesetze, indem er Kugeln auf einer schiefen Ebene herunterrollen ließ. Zur Anstellung der Galiläi'schen Fallversuche bedient man sich einer etwa 20 dm langen hölzernen Fallrinne *ab*, Fig. 150,

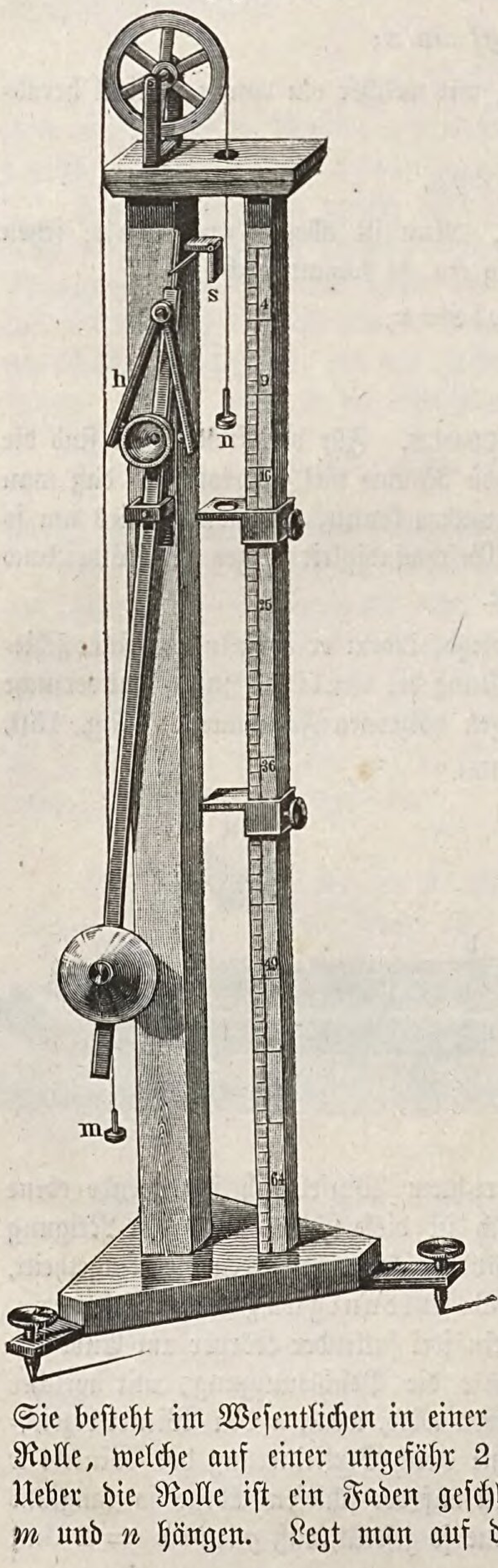
Fig. 150.



welche durch zwei wohl polirte, unter rechtem Winkel sich schneidende ebene Flächen gebildet wird. Der Länge nach ist diese Fallrinne, deren Neigung gegen die Horizontale man beliebig verändern kann, in Decimeter eingetheilt, wie die Fig. 150 zeigt. Ist *g* die Beschleunigung der Schwere, d. h. ist *g* die Geschwindigkeit, welche ein frei fallender Körper am Ende der ersten Secunde erlangt hat, so ist $g \sin x$ die Beschleunigung, mit welcher die Kugel in der Fallrinne heruntergetrieben wird, wenn *x* den Winkel bezeichnet, welchen sie mit der Horizontalen macht; durch Verkleinerung des Winkels *x* hat man es also in der Gewalt, den Fall auf der schiefen Ebene so langsam zu machen als man will. Ist die Fallrinne so gestellt, daß $g . \sin x = 2$ dm,

daß also der Fallraum der ersten Secunde 1 dm ist, so wird man finden, daß die Kugel in 2, 3 ... Secunden einen Weg von 4, 9 ... dm in der Fallrinne durchläuft, daß sich also die Fallräume wirklich wie die Quadrate der Fallzeiten verhalten.

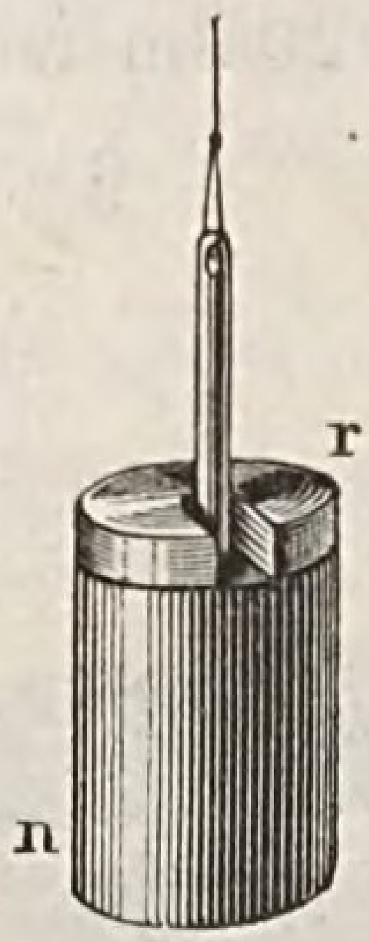
Fig. 151.



Um den Versuch anzustellen wird der Klotz *K* so gestellt, daß seine Vorderfläche (links) bei *b* gerade auf den Nullpunkt der Theilung zu stehen kommt. Läßt man dann die Kugel mittelst des Brettchens *L* beim Schlage eines Secundenpendels bei 1, 4 oder 9 los, so schlägt sie nach 1, 2, oder 3 Secunden am Klotz *K* an.

Ist der Apparat so construirt, daß sich die Rinne vom unteren Ende *b* der schiefen Ebene an in horizontaler Richtung *bc* fortsetzt, so läßt sich wenigstens mit annähernder Genauigkeit zeigen, daß die erlangten Endgeschwindigkeiten der Fallzeit proportional sind. Stellt man den Klotz *K* bei den Theilstrichen 2, 4, 6 der horizontalen Rinne *bc* auf, so wird die Kugel an ihm 2, 3, 4 Secunden später anschlagen, als man sie in den Punkten 1, 4, 9 der schiefen Ebene losgelassen hat. Ist also die Kugel in 1, 2 oder 3 Secunden von den Punkten 1, 4 oder 9 bis *b* auf der schiefen Ebene herabgefallen, so läuft sie vermöge der erlangten Geschwindigkeit (ohne weitere Beschleunigung) auf der horizontalen Ebene in der folgenden Secunde von *b* an noch 2, 4 oder 6 dm weiter.

Fig. 152.



Weit genauerere Resultate als mit der Fallrinne erhält man mit der Atwood'schen Fallmaschine (Fig. 151). Sie besteht im Wesentlichen in einer um eine horizontale Axe leicht drehbaren Rolle, welche auf einer ungefähr 2 m hohen verticalen Säule befestigt ist. Ueber die Rolle ist ein Faden geschlungen, an dessen Enden gleiche Gewichte *m* und *n* hängen. Legt man auf der einen Seite ein Uebergewicht *r* auf,

so wird das Gleichgewicht gestört; die Gewichte $n + r$ auf der einen Seite fallen, das Gewicht m auf der anderen Seite wird gehoben. Die Geschwindigkeit, mit welcher diese Bewegung vor sich geht, ist aber weit langsamer als beim freien Fall, weil die bewegende Kraft, welche in der Schwere des Uebergewichts r besteht, nicht allein die Masse von r, sondern die Masse von $m + n + r$, sowie die des Rades in Bewegung zu setzen hat.

Man sieht wohl ein, daß die Bewegung um so langsamer werden wird, je kleiner das Uebergewicht r im Verhältniß zu den zu bewegenden Massen ist, und man kann also durch zweckmäßige Veränderung von r die Bewegung so langsam machen als man will.

Um die Fallräume bequem messen zu können, ist an der verticalen Säule eine in Centimeter getheilte Scala angebracht. Der oberste Punkt der Theilung ist der Nullpunkt der Scala. Zwei Schieber, von denen der obere durchbrochen ist, können an jeder Stelle der Scala festgestellt werden.

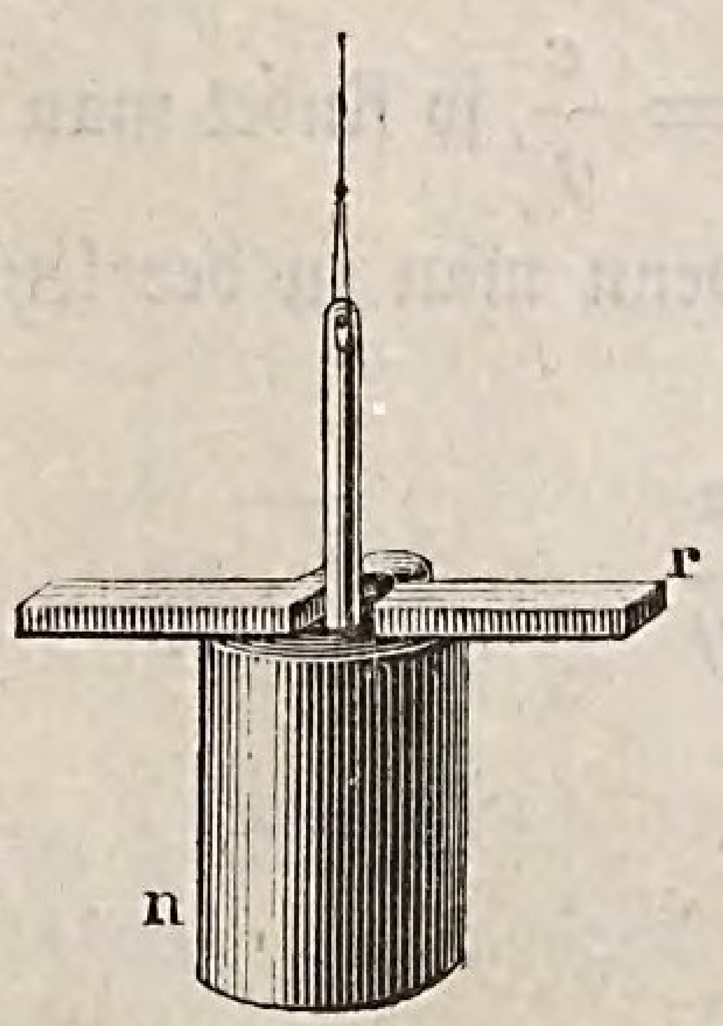
Fig. 152 zeigt die zweckmäßigste Form des Gewichts n und des Uebergewichts r.

Soweit ist die Kenntniß des Apparats nöthig, um den Zusammenhang der Versuche zu verstehen.

Zunächst läßt sich mit der Fallmaschine leicht darthun, daß sich die Fallräume wie die Quadrate der Fallzeiten verhalten. Es sei r so gewählt, daß der Fallraum der ersten Secunde 5 cm ist. Wenn das untere Ende des Gewichts n, welches das Uebergewicht trägt, sich in der Höhe des Nullpunktes der Scala befindet, so wird eine Secunde nach dem Beginne der Bewegung das Gewicht 5 cm unter dem Nullpunkt eintreffen.

Wenn der Fallraum der ersten Secunde 5 cm ist, so muß in den zwei ersten Secunden ein Weg von 20 cm zurückgelegt werden; wenn man also den unteren Schieber 20 cm unter den Nullpunkt stellt, so wird das Gewicht, welches beim Punkte Null seine Bewegung begonnen hat, am Ende der zweiten Secunde aufschlagen.

Fig. 153.



Wenn man die Bewegung stets in demselben Punkte, d. h. im Nullpunkte der Scala beginnen läßt, so hat man den Schieber 45, 80, 125, 180 cm unter diesem Punkte festzustellen, wenn das Gewicht nach 3, 4, 5, 6 Secunden aufschlagen soll. Der Versuch bestätigt vollkommen das Gesetz, daß sich die Fallräume verhalten wie die Quadrate der Fallzeiten.

Wendet man ein Uebergewicht r von der Form Fig. 153 an, so wird es auf dem durchbrochenen Schieber liegen bleiben, während n durch diesen Schieber hindurchgeht. Wenn nun auf diese Weise das Uebergewicht abgenommen wird, so wirkt von diesem Moment an keine beschleunigende Kraft mehr, und doch dauert die Bewegung fort und zwar mit gleichförmiger Geschwindigkeit, mit derjenigen nämlich, welche die bewegten Massen in dem Zeitpunkte haben, in welchem das Uebergewicht abgehoben wird.

Man kann nun den durchbrochenen Schieber so stellen, daß das Uebergewicht am Ende der zweiten, dritten u. s. w. Fallsecunde abgenommen wird, und dann leicht zeigen, daß nach Abnahme des Uebergewichts die Geschwindigkeit völlig gleichförmig ist, d. h. daß von diesem Augenblicke an in jeder folgenden Secunde ein gleich großer Weg zurückgelegt wird.

71 **Gleichförmig verzögerte Bewegung.** Wenn ein Körper vertical in die Höhe geworfen wird, so steigt er mit abnehmender Geschwindigkeit; nach einiger Zeit hört seine aufwärts gerichtete Bewegung auf und er beginnt zu fallen. Die Gesetze dieser Bewegung folgen unmittelbar aus dem Vorhergehenden.

Es sei c die Geschwindigkeit beim Beginne des Steigens, so ist die Geschwindigkeit des Körpers nach t Secunden

$$v = c - gt.$$

Das Steigen hört auf, wenn $v = 0$, also wenn $gt = c$, d. h. wenn die in t Secunden erlangte Fallgeschwindigkeit der Geschwindigkeit gleich ist, mit welcher der Körper zu steigen begonnen hat.

Die Zeit, welche der Körper braucht, um den höchsten Punkt seiner Bahn zu erreichen, ist also:

$$t = \frac{c}{g} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Suchen wir nun die Höhe zu bestimmen, welche der steigende Körper nach einer gegebenen Zeit erreicht hat.

In t Secunden würde der Körper vermöge seiner ursprünglichen Geschwindigkeit c zu der Höhe ct steigen, er ist aber durch die Schwere um $\frac{g}{2}t^2$ herabgezogen worden, seine wirkliche Höhe s ist demnach

$$s = ct - \frac{g}{2}t^2.$$

Da der höchste Punkt der Bahn erreicht wird, wenn $t = \frac{c}{g}$, so findet man die größte Höhe h, welche der Körper überhaupt erreicht, wenn man in der letzten Gleichung statt t diesen Werth setzt, also

$$h = \frac{c^2}{g} - \frac{g}{2}\frac{c^2}{g^2} = \frac{c^2}{g} - \frac{c^2}{2g}$$

und daraus endlich

$$h = \frac{c^2}{2g} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Die Zeit t, welche ein Körper braucht, um die Höhe h zu durchfallen, ist aber nach Gleichung 2) auf Seite 133

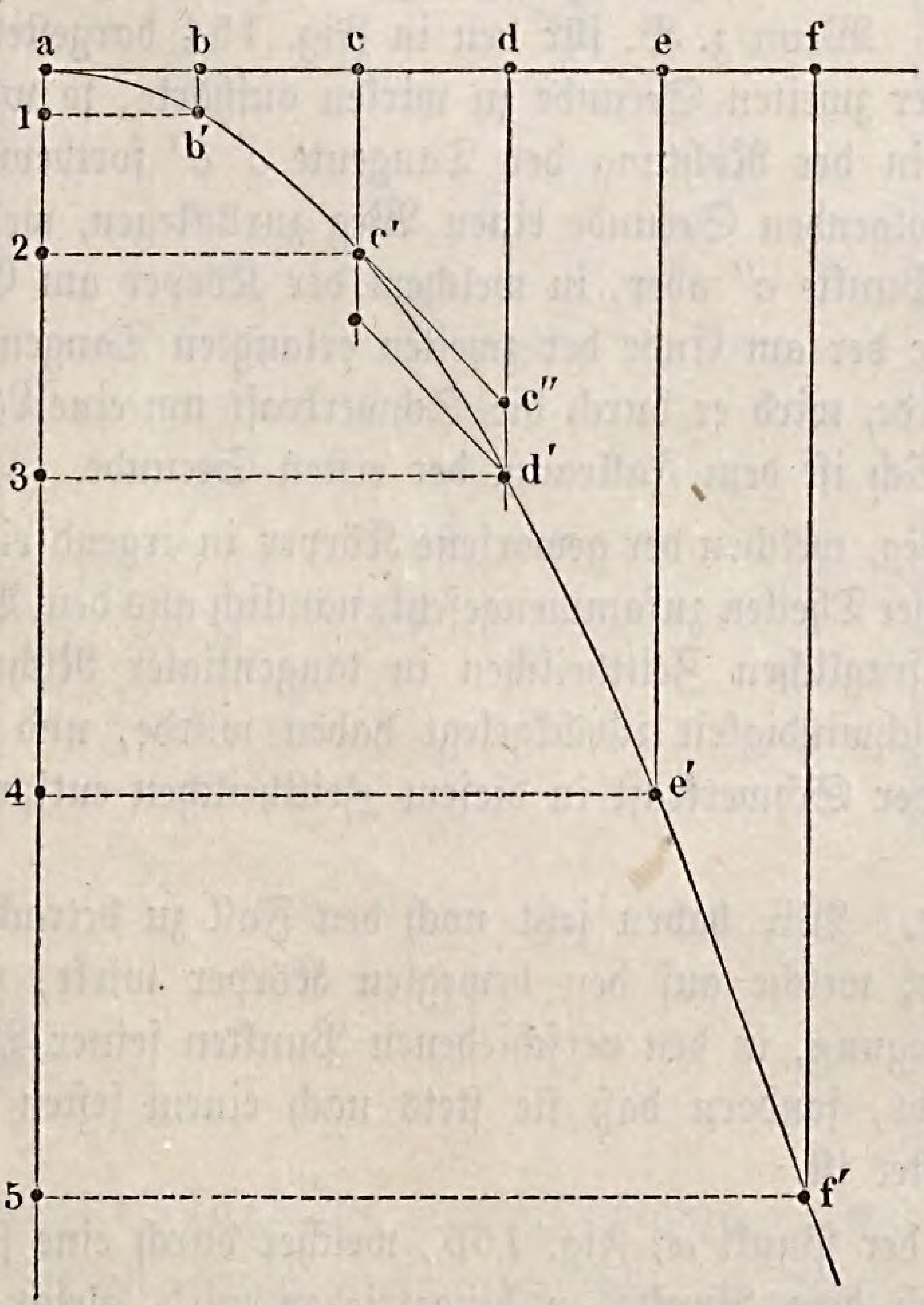
$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2c^2}{2g^2}} = \frac{c}{g},$$

zum Herabfallen von der Höhe h braucht also der Körper ebenso viel Zeit, als er zum Aufsteigen bis zu der Höhe h nöthig hatte.

Die Geschwindigkeit, mit welcher der herabfallende Körper wieder in dem Punkte ankommt, in welchem er die steigende Bewegung begann, finden wir nach der Formel $v = gt$; da aber die Fallzeit $t = \frac{c}{g}$, so ergiebt sich $v = c$, d. h. der Körper kommt mit derselben Geschwindigkeit unten wieder an, mit der er zu steigen begann; oder um einen Körper bis zu einer Höhe h vertical in die Höhe zu treiben, muß man ihm eine Anfangsgeschwindigkeit ertheilen, die gerade so groß ist als diejenige, welche er durch den freien Fall von der Höhe h herab erlangt.

Wurfbewegung. In den bisher betrachteten Fällen konnte die 72
Schwerkraft nur Veränderungen in der Geschwindigkeit des bewegten Körpers bewirken, weil seine Bewegungsrichtung mit der Richtung der Schwerkraft in eine und dieselbe gerade Linie fiel. Wenn aber dem Körper auf irgend eine Weise eine Geschwindigkeit ertheilt wird, deren Richtung einen Winkel mit der Richtung der Schwerkraft macht, so wird letztere eine stetige Ablenkung von der geradlinigen Bahn bewirken, der bewegte Körper wird also in solchem Falle eine krumme Linie beschreiben müssen. Der einfachste hierher gehörige Fall ist die **Wurfbewegung**. Nehmen wir an, daß der Körper durch den Wurf eine Geschwindigkeit in horizontaler Richtung erlangt habe; dann würde er sich, wenn die Schwere nicht wäre, fortwährend in horizontaler Richtung fortbewegen und zwar mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Angenommen nun es sei ab, Fig. 154, diese Geschwindigkeit, so würde der Körper in der ersten Secunde den Weg ab, in der zweiten den gleich großen Weg bc u. s. w. zurücklegen, er müßte sich also am Ende der ersten, zweiten, dritten u. s. w. Secunde in den Punkten b, c, d u. s. w. befinden. Durch die gleichzeitige Wirkung der Schwere aber sinkt er, und zwar sinkt er in der ersten

Fig. 154.



Secunde um 5 m; der Körper wird sich also am Ende der ersten Secunde nicht in b, sondern in b' 5 m unter b befinden. Am Ende der zweiten Secunde ist er in c' 20 m unter c, am Ende der dritten Secunde in d' 45 m unter d. Verbindet man nun die Punkte $a, b', c', d' \ldots$ durch einen stetigen Linienzug, so erhält man die Curve, welche der geworfene Körper beschreibt; dieselbe ist eine Parabel.

Wenn der Wurf in irgend einer anderen Richtung stattfindet, so läßt sich die Bahn auf dieselbe Weise durch Construction ermitteln. (Siehe im Supplementband.)

Die Bahn, welche ein geworfener Körper wirklich beschreibt, die ballistische Curve, weicht wegen des Widerstandes der Luft bedeutend von der parabolischen Gestalt ab.

Wenn in einem bestimmten Moment die Schwerkraft auf den in der Wurflinie sich bewegenden Körper zu wirken aufhörte, so würde er sich von diesem Augenblicke an in tangentialer Richtung mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegen. Wenn z. B. für den in Fig. 154 dargestellten Fall die Schwere am Ende der zweiten Secunde zu wirken aufhörte, so würde der Körper sich von da an in der Richtung der Tangente $c' c''$ fortbewegen und zwar würde er in jeder folgenden Secunde einen Weg zurücklegen, welcher gleich $c' c''$ ist. Von dem Punkte c'' aber, in welchem der Körper am Ende der dritten Secunde, vermöge der am Ende der zweiten erlangten Tangentialgeschwindigkeit ankommen würde, wird er durch die Schwerkraft um eine Länge $c'' d'$ herabgezogen, welche gleich ist dem Fallraum der ersten Secunde.

So ist überhaupt der Weg, welchen der geworfene Körper in irgend einem Zeittheilchen zurücklegt, aus zwei Theilen zusammengesetzt, nämlich aus dem Weg, welchen der Körper in dem fraglichen Zeittheilchen in tangentialer Richtung vermöge seiner erlangten Geschwindigkeit zurückgelegt haben würde, und dem Weg, welcher der Wirkung der Schwerkraft in diesem Zeittheilchen entspricht.

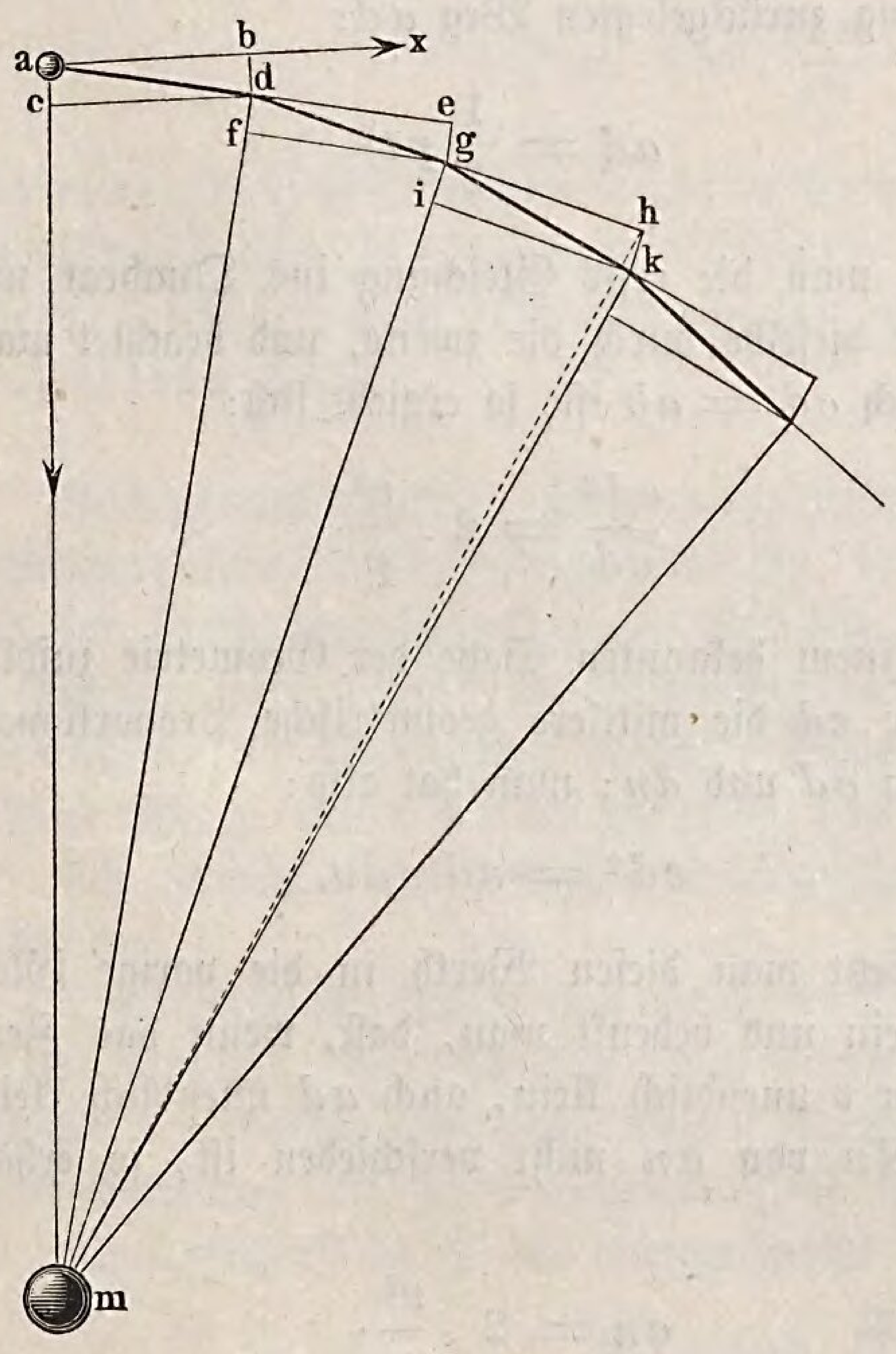
73 **Centralbewegung.** Wir haben jetzt noch den Fall zu betrachten, daß die beschleunigende Kraft, welche auf den bewegten Körper wirkt, nicht mehr, wie bei der Wurfbewegung, in den verschiedenen Punkten seiner Bahn parallel mit sich gerichtet bleibt, sondern daß sie stets nach einem festen Anziehungsmittelpunkt hin gerichtet ist.

Denken wir uns, daß der Punkt a, Fig. 155, welcher durch eine stetig wirkende Anziehungskraft nach dem Punkte m hingetrieben wird, gleichzeitig eine Geschwindigkeit in der Richtung ax hat, so wird er sich weder in der Richtung ax, noch in der Richtung am bewegen, sondern in einer anderen, die sich nach dem Gesetze des Parallelogramms der Bewegungen ausmitteln läßt.

Angenommen der Körper a würde vermöge seiner Geschwindigkeit in einem sehr kleinen Zeittheilchen τ von a nach b, vermöge der anziehenden Kraft aber in derselben Zeit von a nach c gelangen, so bewegt er sich dem eben erwähnten Satz zufolge von a nach dem Punkte d des Parallelogramms

abdc. In *d* angekommen, würde er sich in der Richtung *de* weiter bewegen, und zwar würde der in der Zeit τ zurückgelegte Weg *de* gerade so groß sein wie *ad*, wenn nicht die anziehende Kraft fortwirkte und den Körper in der Richtung *dm* von *d* nach *f* zu führen suchte. Durch diese Wirkung der anziehenden Kraft wird der Körper von der Richtung *de* abgelenkt und nach *g* geführt. Ebenso findet man, daß der Körper am Ende des dritten Zeittheilchens τ sich in *k* befindet. Der Körper durchläuft also die Punkte *a*, *d*, *g*, *k* und erfährt in jedem kleinsten Zeittheilchen seiner Bewegung eine Ablenkung von seiner Richtung; seine Bahn ist demnach eine Curve, deren Natur theils von der Größe und Richtung der Anfangsgeschwindigkeit und seiner Entfernung von dem anziehenden Punkte, theils von dem Gesetze abhängt, nach welchem die anziehende Kraft wirkt.

Fig. 155.



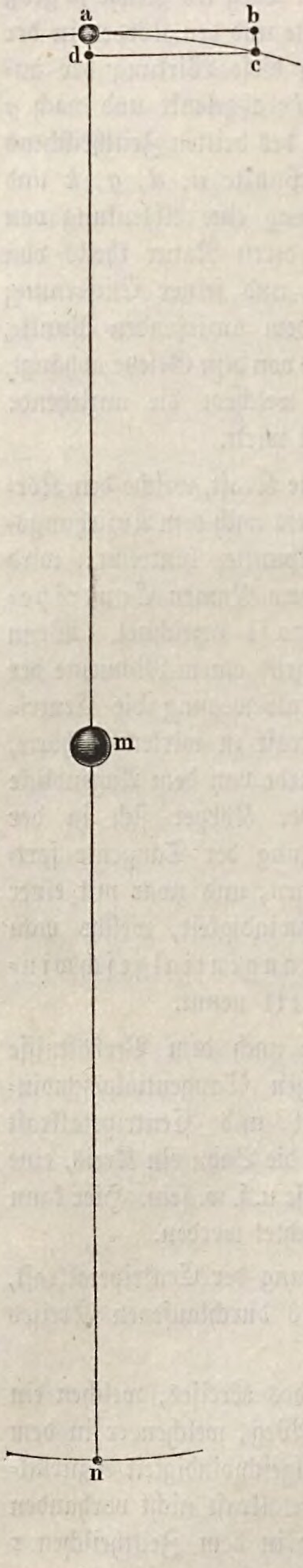
Die Kraft, welche den Körper stets nach dem Anziehungsmittelpunkte hintreibt, wird mit dem Namen **Centripetalkraft** bezeichnet. Wenn in irgend einem Momente der Centralbewegung die Centripetalkraft zu wirken aufhörte, so würde von dem Augenblicke an der Körper sich in der Richtung der Tangente fortbewegen, und zwar mit einer Geschwindigkeit, welche man die **Tangentialgeschwindigkeit** nennt.

Je nach dem Verhältnisse zwischen Tangentialgeschwindigkeit und Centripetalkraft kann die Bahn ein Kreis, eine Ellipse u. s. w. sein. Hier kann nur die **kreisförmige** Centralbewegung näher betrachtet werden.

Die Beziehung, welche zwischen der Beschleunigung der Centripetalkraft, der Tangentialgeschwindigkeit und dem Halbmesser des durchlaufenen Kreises stattfindet, läßt sich auf folgende Weise ermitteln.

In Fig. 156 (a. f. S.) sei *m* der Mittelpunkt des Kreises, welchen ein eben in *a* befindlicher Körper durchläuft; *ab* sei der Weg, welchen er in dem unendlich kleinen Zeittheilchen τ vermöge der Tangentialgeschwindigkeit *v* zurücklegen würde, wenn die Beschleunigung *p* der Centripetalkraft nicht vorhanden wäre; dagegen sei *ad* der Weg, welchen der Körper in dem Zeittheilchen τ

Fig. 156.



vermöge der Beschleunigung der Centripetalkraft zurücklegen würde, wenn er keine Tangentialgeschwindigkeit hätte: dann gelangt der Körper vermöge beider Bewegungen von dem Punkte a nach dem gegenüberliegenden Eckpunkte c des Rechtecks $abcd$, und es ist, da ab mit gleichförmiger Bewegung zurückgelegt wird,

$$ab = v\tau.$$

In der Richtung von a nach d hat der Körper eine gleichförmig beschleunigte Bewegung mit der Beschleunigung p; daher hat man für den in dieser Richtung zurückgelegten Weg ad:

$$ad = \frac{1}{2} p\tau^2.$$

Erhebt man die erste Gleichung ins Quadrat und dividirt dieselbe durch die zweite, und beachtet man, daß auch $cd = ab$ ist, so ergiebt sich:

$$\frac{cd^2}{ad} = 2 \,.\, \frac{v^2}{p}.$$

Einem bekannten Satze der Geometrie zufolge ist aber cd die mittlere geometrische Proportionale zwischen ad und dn; man hat also:

$$cd^2 = ad \,.\, dn.$$

Setzt man diesen Werth in die vorige Gleichung ein und bedenkt man, daß, wenn das Zeittheilchen τ unendlich klein, auch ad unendlich klein, somit dn von an nicht verschieden ist, so erhält man:

$$an = 2 \,.\, \frac{v^2}{p}.$$

Hieraus aber folgt, wenn man statt an den doppelten Radius $2r$ setzt:

$$v^2 = p \,.\, r \quad . \;.\;.\;.\;. \quad 1)$$

d. h. die **Tangentialgeschwindigkeit ist die mittlere geometrische Proportionale zwischen der Centripetalbeschleunigung und dem Radius der Kreisbahn, welche der Körper durchläuft.**

Bezeichnet man die Centripetalkraft mit P, die Masse des sich bewegenden Körpers mit M, so hat man auch:

$$p = P : M;$$

führt man diesen Werth in die Gleichung 1) ein und bestimmt P, so kommt:

$$P = \frac{Mv^2}{r}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

woraus die Centripetalkraft berechnet werden kann.

Ist statt der Tangentialgeschwindigkeit v die Umlaufszeit t gegeben, so ist, da der Umfang der Bahn $2\pi r$ in der Zeit t durchlaufen wird,

$$v = 2\pi r : t$$

und somit auch:

$$P = 4\pi^2 . \frac{Mr}{t^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Bei einer kreisförmigen Centralbewegung ist also die Centripetalkraft der Masse des Körpers und dem Halbmesser des Kreises direct und dem Quadrate der Umlaufszeit umgekehrt proportional.

Schwungkraft. Wenn man irgend einen schweren Körper an dem einen Ende einer Schnur befestigt, und ihn, das andere Ende in der Hand haltend, im Kreise herumschwingt, wie dies Fig. 157 (a. f. S.) andeutet, so wird die Schnur fortwährend eine Spannung auszuhalten haben, welche mit der Schnelligkeit der Umdrehung wächst. Wenn in irgend einem Momente die Schnur risse, so würde der Körper nicht mehr im Kreise sich fortbewegen, sondern sich vermöge seiner Trägheit in tangentialer Richtung von der Kreisbahn entfernen. 74

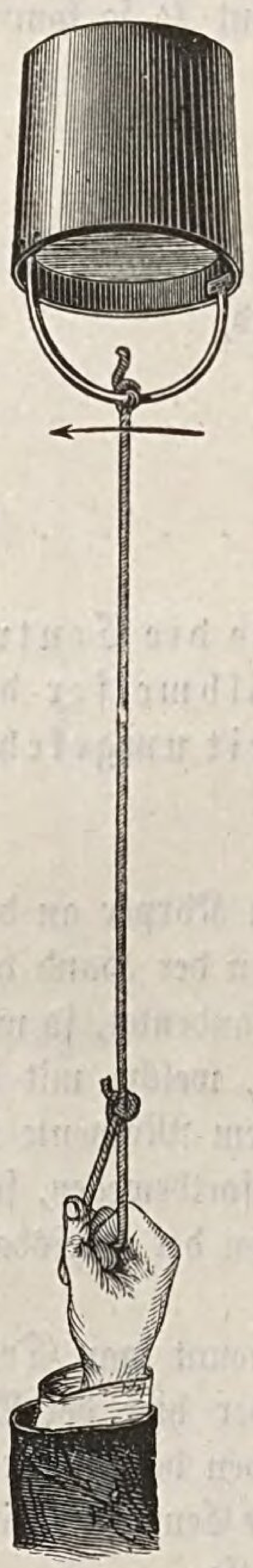
Die Ursache der Spannung, welche die Schnur erleidet, nennt man Centrifugalkraft, Fliehkraft, Schwungkraft. Da aber hier der Widerstand der Schnur denselben Effect hervorbringt, wie die oben bei der freien Centralbewegung betrachtete Centripetalkraft, so ist klar, daß die Centrifugalkraft der Centripetalkraft gleich und entgegengesetzt ist; dieselbe ist also:

$$P = 4\pi^2 . \frac{Mr}{t^2} .$$

Schwungkraft zeigt sich überall da, wo eine Rotation um eine feste Axe stattfindet, und die einzelnen Theilchen auf irgend eine Weise verhindert sind, sich von jener Axe zu entfernen. Eine solche Schwungkraft muß also auch bei der Rotation der Erde um ihre eigene Axe vorhanden sein. Da die Umlaufszeit für alle Punkte auf der Erde gleich groß ist, die verschiedenen Punkte aber nicht gleich weit von der Umdrehungsaxe entfernt sind, so ist klar, daß nicht überall auf der Erdoberfläche jene Schwungkraft gleich ist, sondern sich verhält wie die Entfernungen von der Erdaxe; sie ist also gleich Null an den Polen und erreicht ihr Maximum an dem Aequator.

Diese Schwungkraft, welche am Aequator am größten ist und nach den Polen hin abnimmt, wirkt der Schwere entgegen; sie vermindert gleichsam die Intensität der Schwere. Es läßt sich leicht berechnen, wie groß die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde um ihre Axe sein müßte, wenn die dadurch erzeugte Schwungkraft am Aequator die Wirkung der Schwere daselbst vollständig aufheben sollte.

Fig. 157.



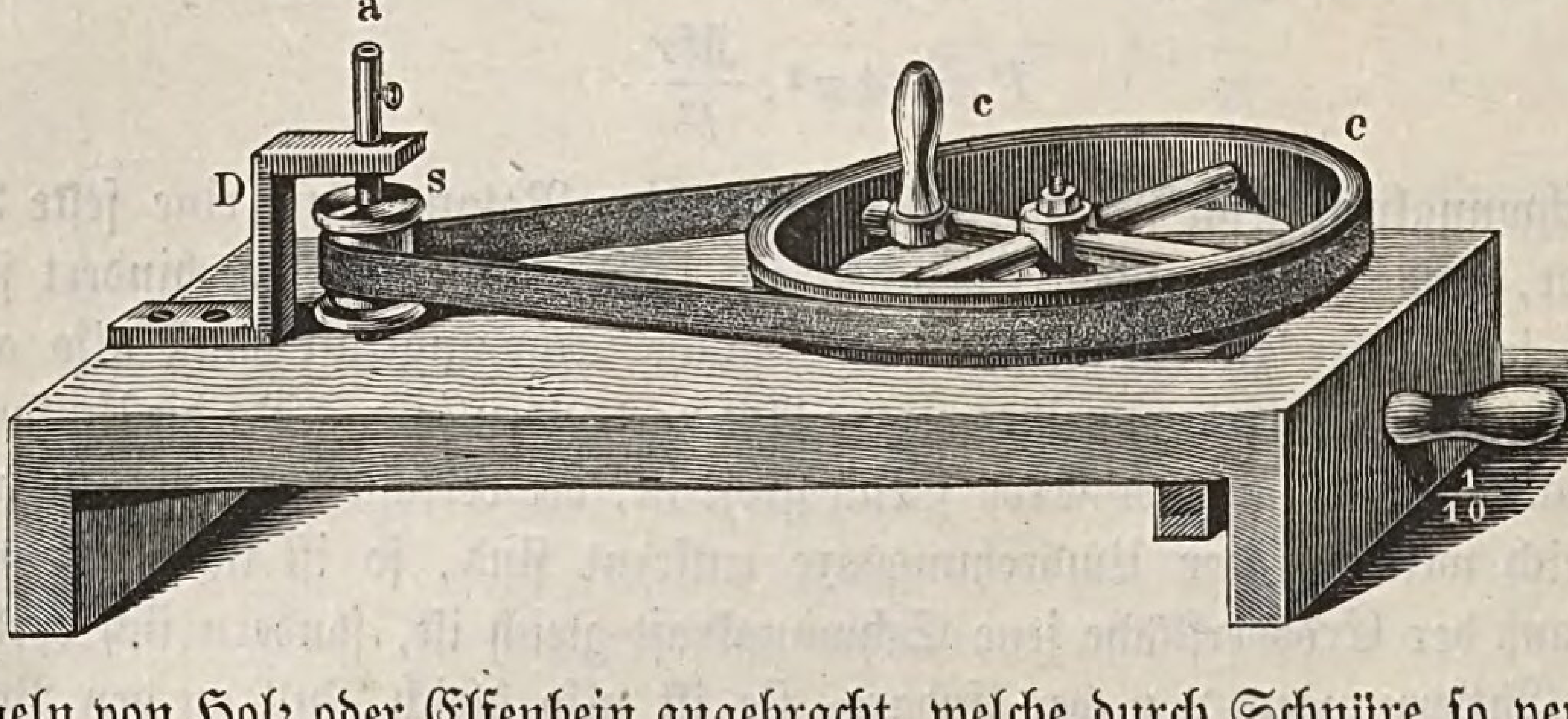
Wenn ein mit Wasser gefülltes Gefäß, Fig. 157, in verticaler Ebene umgeschwungen wird, so kann das Wasser selbst in dem Moment nicht ausfließen, in welchem die Oeffnung des Gefäßes gerade nach unten gekehrt ist, wenn in Folge der Umdrehungsgeschwindigkeit die Schwungkraft, also der obige Werth von P, größer wird als das Gewicht des Wassers.

Um Versuche über die Schwungkraft anzustellen, wendet man die sogenannte Centrifugal- oder Schwungmaschine an. Eine solche ist in Fig. 158 dargestellt. — Eine größere Scheibe c ist mit einer kleineren s durch einen gespannten Riemen verbunden, so daß, wenn man die größere Scheibe mittelst einer Handhabe umdreht, die Bewegung in der Art auf die kleinere übertragen wird, daß dieselbe eine größere Anzahl von Umdrehungen macht. Schraubt man nun irgend einen Gegenstand auf die Umdrehungsaxe der kleinen Scheibe auf, so kann man denselben durch Umdrehung der großen Scheibe in sehr rasche Rotation versetzen.

Unter verschiedenen Versuchen, die man mit der Schwungmaschine zur Erläuterung der Schwungkraft anstellen kann, wollen wir hier nur einige anführen.

Der Apparat Fig. 159 sei mit der Hülse b auf den Zapfen a der Schwungmaschine aufgeschraubt. An einem horizontalen Metallstäbchen sind zwei leicht verschiebbare

Fig. 158.



Kugeln von Holz oder Elfenbein angebracht, welche durch Schnüre so verbunden sind, daß sie nicht über eine gewisse Gränze von einander entfernt werden können.

Wird der Apparat in rasche Rotation versetzt, so werden die Kugeln ein Bestreben haben, sich von der Umdrehungsaxe zu entfernen; sie können jedoch nicht auseinanderfahren, weil dies durch die Schnüre verhindert wird; daher muß diejenige Kugel, deren Schwungkraft größer ist, die andere nach ihrer Seite hin nachziehen. Soll die Schwungkraft beider gleich sein und also keine Bewegung entstehen, so müssen die Abstände der beiden Kugeln von der Umdrehungsaxe sich umgekehrt verhalten, wie ihre Massen. Bezeichnet man nämlich die Massen der beiden Kugeln mit M und M', ihre Abstände von der Umdrehungsaxe mit r und r' und ihre Umlaufszeit mit t, so sind ihre Schwungkräfte

$$4\pi^2 . \frac{Mr}{t^2} \text{ und } 4\pi^2 . \frac{M'r'}{t^2}.$$

Da aber die Schwungkräfte einander gleich sein sollen, so muß auch

$$Mr = M'r'$$

sein, oder es muß sich verhalten

$$M : M' = r' : r,$$

was mit obiger Behauptung übereinstimmt.

Der Apparat Fig. 160 dient zur Erläuterung der Abplattung der Erde als einer Folge ihrer Axendrehung. An dem unteren Ende der eisernen

Fig. 160.

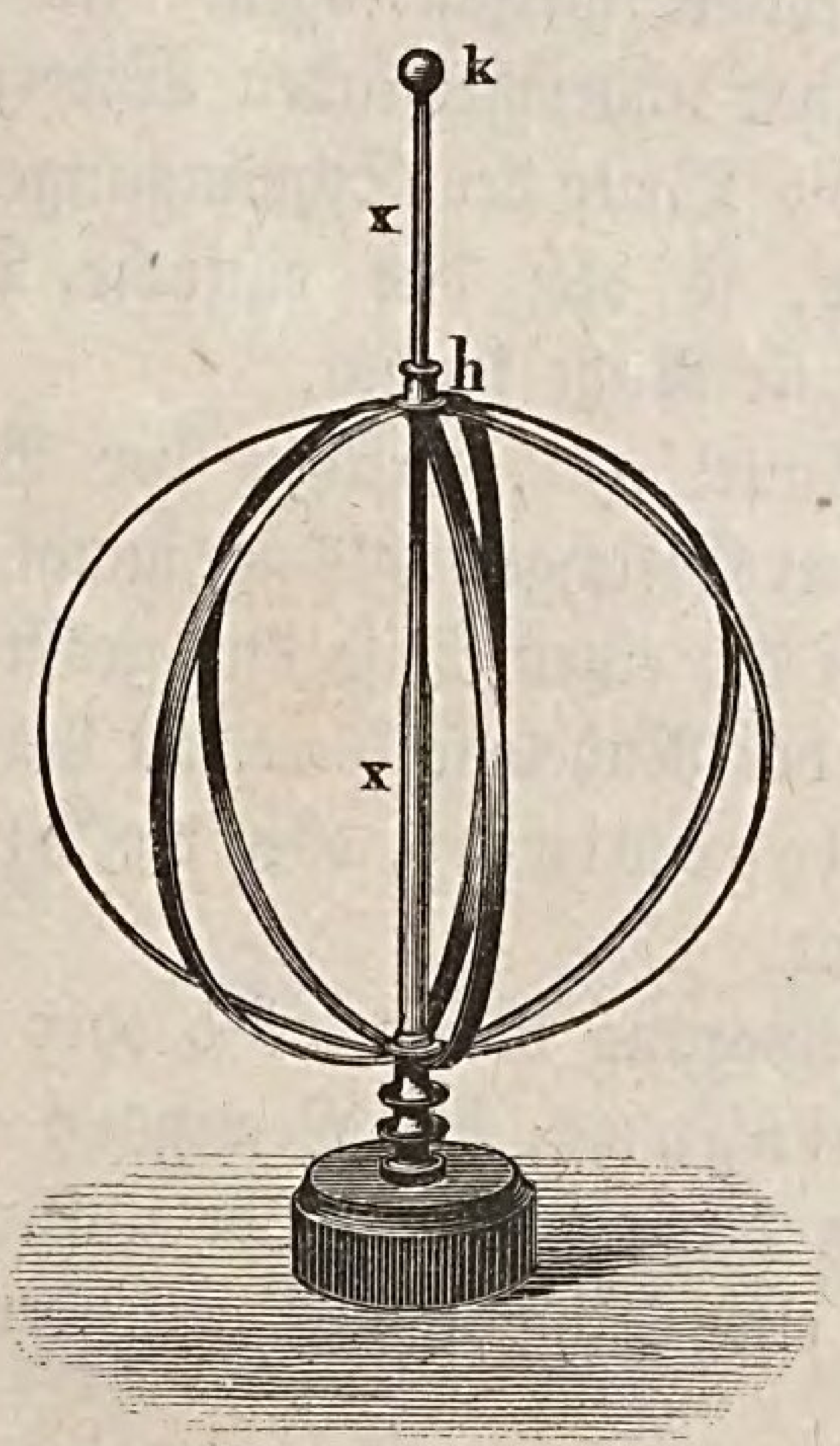
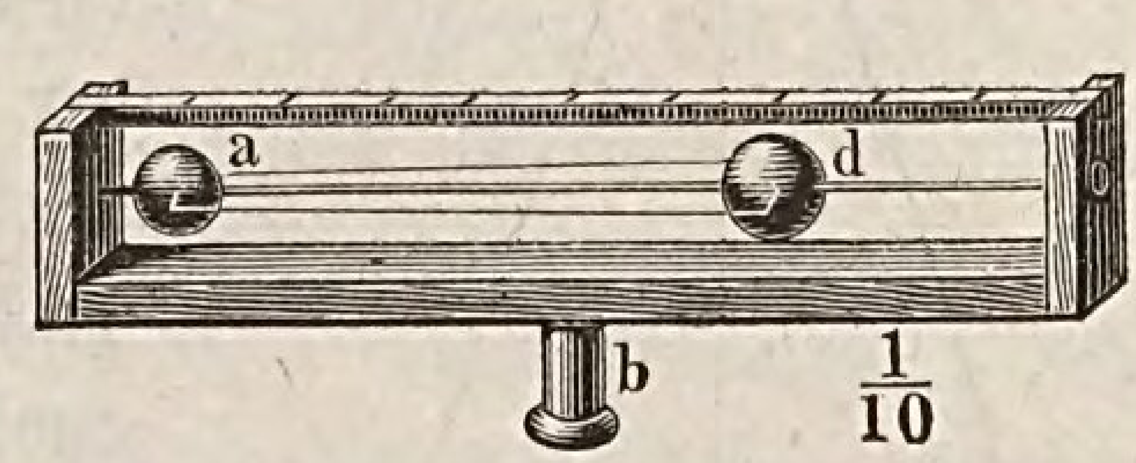


Fig. 159.



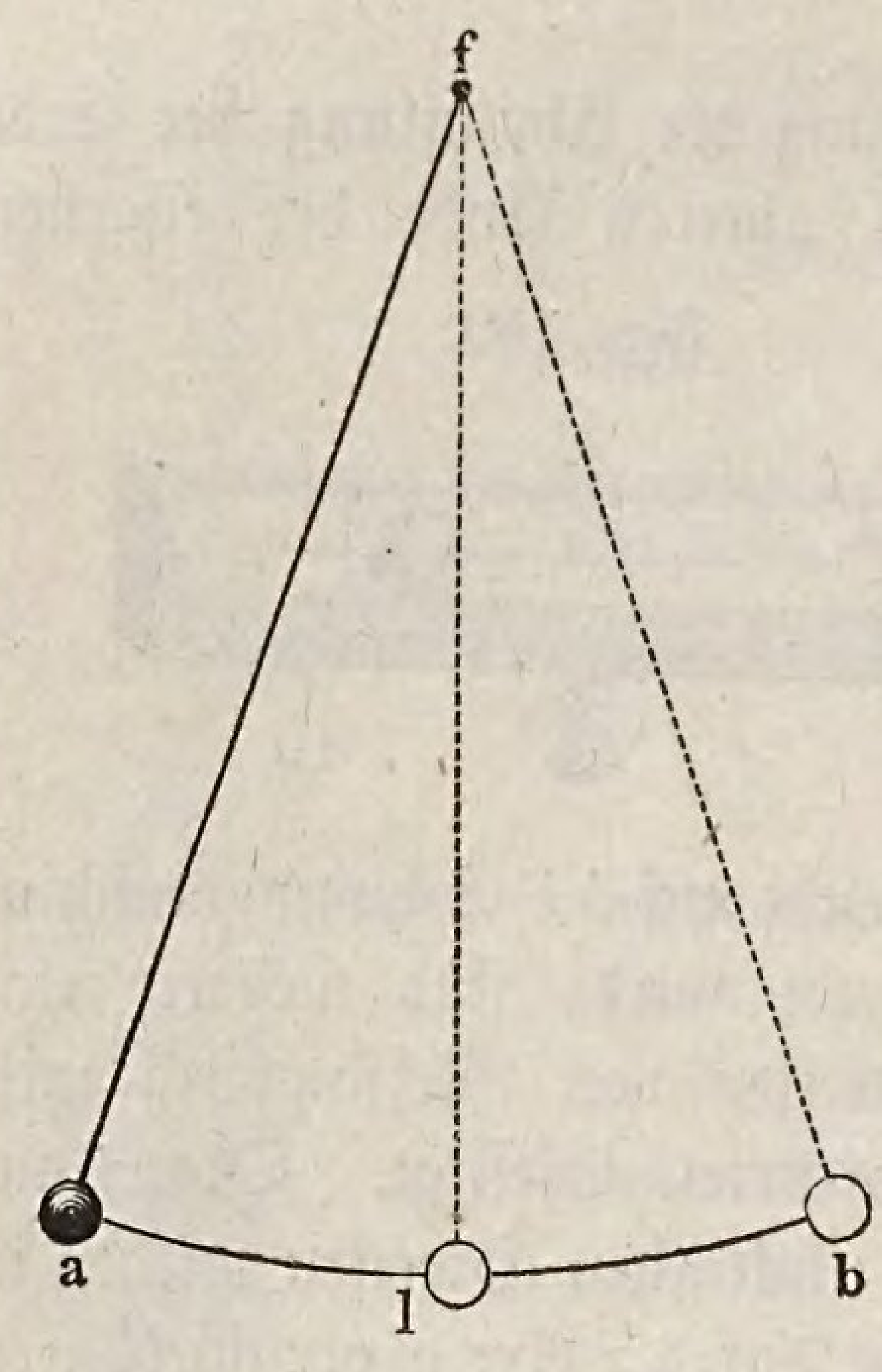
Axe x, welche auf die Schwungmaschine aufgeschraubt wird, sind mehrere elastische Streifen von Messingblech mittelst Scharnieren befestigt. Oben laufen diese elastischen Streifen wieder in einer leicht auf der Axe x verschiebbaren Hülse h zusammen. Im Zustande der Ruhe strecken sich die Federn so, daß die Hülse an dem Kopfe k ansteht: sobald aber der Apparat rasch um die Axe x rotirt, nehmen die Metallstreifen die in der Figur angedeutete Gestallt an, indem alle Theilchen derselben sich möglichst weit von der Rotationsaxe zu entfernen streben. Je schneller die Umdrehung ist, desto mehr werden die Streifen gekrümmt, desto tiefer also die Hülse h herabgezogen, desto kürzer wird also die Rotationsaxe des Ellipsoids, welches durch die elastischen Metallstreifen gebildet wird.

Das einfache Pendel. Jeder schwere feste Körper, welcher, wie etwa der in Fig. 43 S. 49 dargestellte, in einem über seinem Schwerpunkt 75

befindlichen Punkte aufgehängt und um denselben drehbar ist, bildet ein materielles Pendel. Denken wir uns den ganzen Körper auf einen einzigen materiellen Punkt reducirt, welcher durch einen gewichtlosen Faden mit dem Aufhängepunkt verbunden ist, so erhalten wir ein einfaches oder mathematisches Pendel, wie es praktisch freilich nicht hergestellt werden kann. Eine dem mathematischen Pendel sehr nahekommende Vorrichtung, welche gleichfalls als einfaches Pendel bezeichnet wird, erhält man aber, wenn man einen Körper von verhältnißmäßig geringer Ausdehnung, aber großem specifischen Gewicht, etwa eine Metallkugel, an einem hinlänglich starken, aber leichten Faden aufhängt.

Entfernt man das Pendel aus seiner Gleichgewichtslage *fl*, Fig. 161, indem man es etwa in die Lage *fa* bringt, und überläßt man es hierauf sich selbst, so wird es durch die Schwerkraft seiner Gleichgewichtslage wieder zugeführt. Hier kommt es aber mit einer gewissen Geschwindigkeit an, vermöge deren es auf der anderen Seite, wenn man den Einfluß der Bewegungswiderstände unberücksichtigt läßt, bis zu einem Punkte *b* aufsteigt, welcher ebenso hoch über *l* liegt, als *a*. Von dem Punkte *b* schwingt nun das Pendel wieder zurück bis *a* und würde, wenn gar keine Widerstände vorhanden wären, in dieser Weise immer fortschwingen. In Folge der in der That unvermeidlichen Widerstände wird jedoch die Weite der Schwingungen allmälig kleiner, so daß das einfache Pendel endlich ganz zur Ruhe kommt.

Fig. 161.



Der Winkel *afl*, welchen der Pendelfaden mit seiner Gleichgewichtslage macht, wenn die Kugel auf der einen Seite ihre größte Entfernung von der Ruhelage *l* erreicht hat, wird der Ausschlagswinkel, oder die Amplitude genannt.

Die Bewegung von *a* bis *b* oder von *b* bis *a* heißt eine Oscillation oder Schwingung; die Bewegung von *a* bis *l* macht eine halbe niedergehende, die von *l* bis *b* eine halbe aufsteigende Oscillation aus. Die Zeit, während welcher eine Schwingung vollendet wird, heißt Schwingungsdauer.

Die Gesetze der Schwingungen einfacher Pendel sind folgende:

1) Die Schwingungsdauer ist vom Gewichte der Kugel und von der Natur ihrer Substanz unabhängig.

Um dies zu beweisen, mache man mehrere Pendel von gleicher Länge, die Kugel des einen von Metall, die des anderen von Wachs, die des dritten von Holz u. s. w., und man wird finden, daß sie alle gleiche Schwingungsdauer haben.

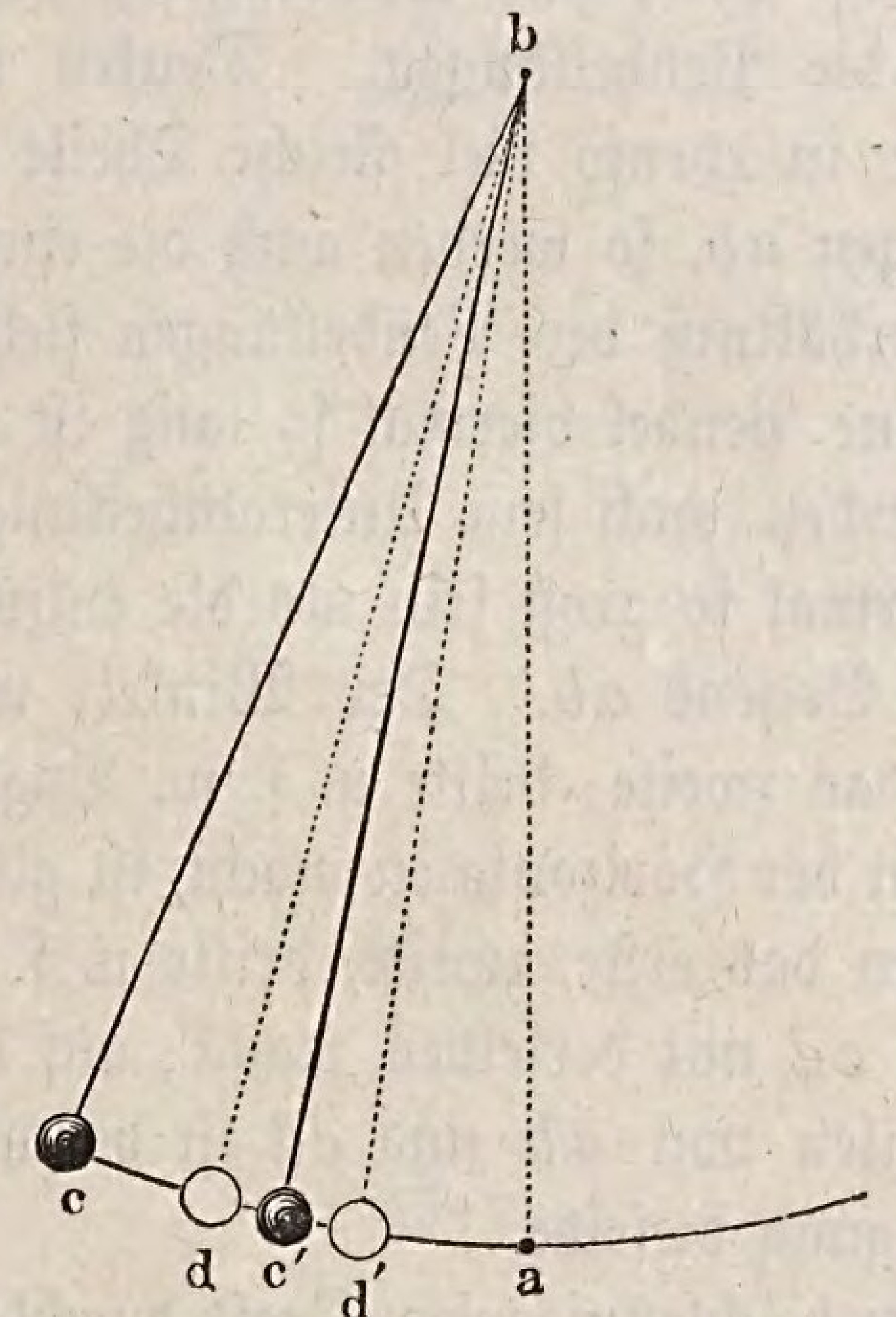
Aus diesem Versuche ergiebt sich die Richtigkeit des bereits in §. 8 aufgestellten Satzes, daß das Gewicht eines Körpers stets seiner Masse proportional

ist, und daß gleiche Massen verschiedener Substanzen mit gleicher Kraft zur Erde niedergezogen werden. Dasselbe folgt auch aus dem Fallversuch im leeren Raum; jedoch ist dies nur ein roher Versuch, weil er die Wirkung der Schwere nur während einer sehr kurzen Zeit beobachten läßt. Das Pendel aber macht es möglich, die Wirkung der Schwere auf verschiedene Stoffe während längerer Zeit zu beobachten.

2) Die Dauer kleiner Oscillationen eines und desselben Pendels ist von der Größe der Schwingungen unabhängig. Wenn z. B. ein Pendel mit einer Amplitude von 2 bis 4^0 schwingt, so ist die Schwingungsdauer dieselbe, als ob sie nur 1^0 betrüge.

Dieses Gesetz läßt sich folgendermaßen entwickeln. Wenn der Ausschlagswinkel nicht gar zu groß ist, so ist die Neigung der Bahn gegen die Horinzontale der Entfernung von der Gleichgewichtslage proportional. Denken wir uns z. B. in c, Fig. 162, eine Tangente an den Kreisbogen gelegt, so macht sie mit der Horizontalen einen Winkel, welcher doppelt so groß ist als derjenige, welchen eine in c' an die Kreisbahn gezogene Tangente mit der Horizontalen macht, vorausgesetzt, daß der Bogen $c'a$ halb so groß ist als der Bogen ca. Wenn also das Pendel in c seine Bewegung beginnt, so ist die beschleunigende Kraft doppelt so groß, als wenn es von c' seinen Niedergang beginnt; der Bogen cd, den wir so klein annehmen wollen, daß wir ihn als gradlinig betrachten können, und der Bogen $c'd'$, welcher nur halb so groß ist, werden also in gleichen Zeiten durchlaufen, wenn die Bewegung einmal in c, ein andermal in c' beginnt.

Fig. 162.



Denken wir uns nun an einer Axe zwei gleiche Pendel aufgehängt, das eine bis c, das andere bis c' gehoben und gleichzeitig losgelassen, so werden sie gleichzeitig in den Punkten d und d' ankommen. Die beschleunigende Kraft in d ist aber doppelt so groß als in d'; außerdem aber langt das eine Pendel in d mit einer Geschwindigkeit an, welche doppelt so groß als diejenige ist, mit welcher das andere im Punkte d' ankommt, und daraus folgt denn, daß in dem nächsten kleinen Zeittheilchen das eine Pendel abermals einen doppelt so großen Weg zurücklegt als das andere. Auf diese Weise fortschließend findet man endlich, daß beide Pendel gleichzeitig in a ankommen müssen.

Diese Schlußweise läßt sich auch noch anwenden, wenn das Verhältniß der Ausschlagswinkel nicht gerade das von 1 zu 2, sondern ein anderes ist, weil für kleine Ausschlagswinkel die beschleunigende Kraft stets der Entfernung von der

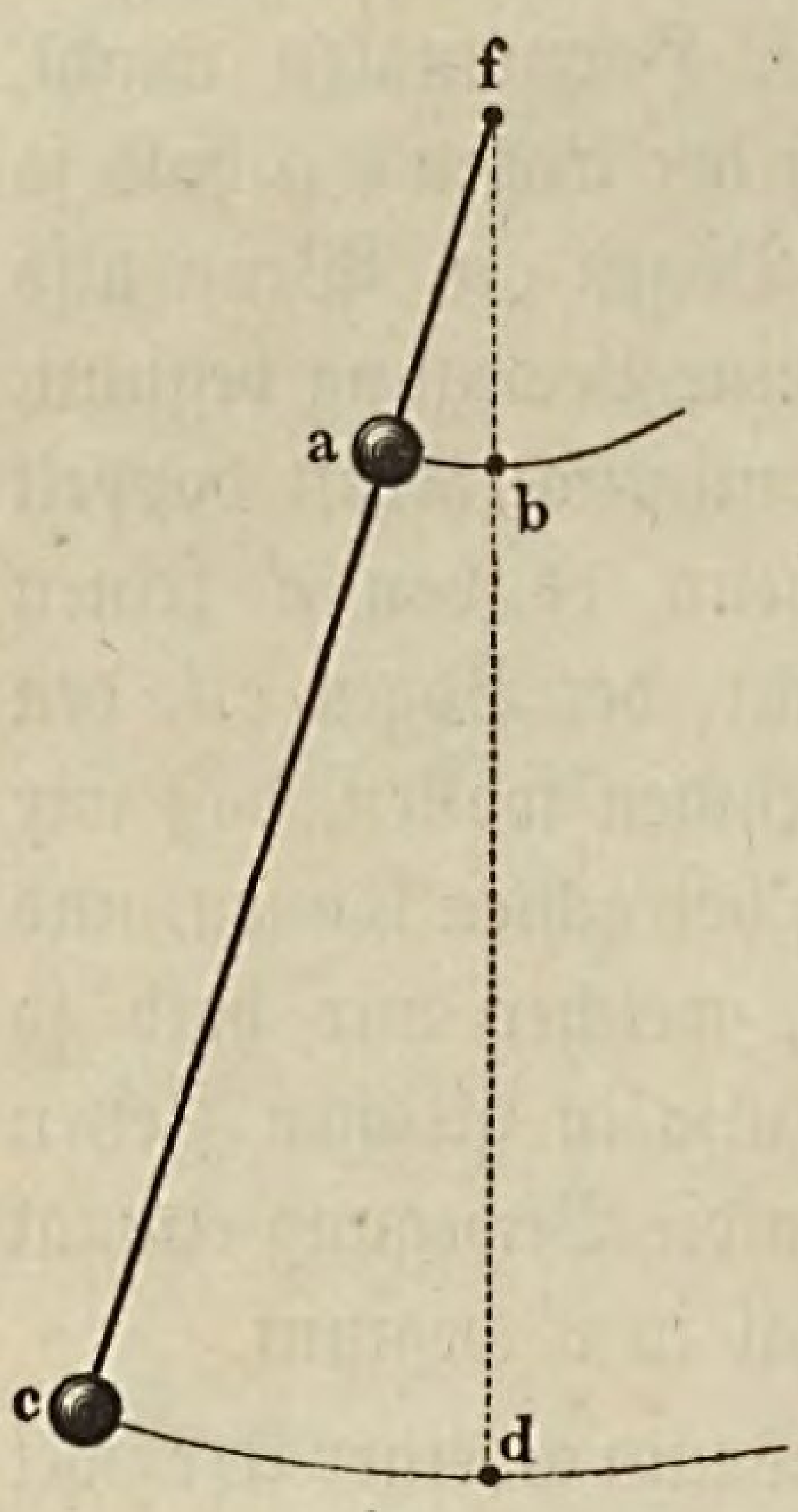
Gleichgewichtslage proportional ist; und so läßt sich allgemein zeigen, daß bis zu einer gewissen Gränze hin die Schwingungsdauer von der Größe der Ausschlagswinkel nicht abhängt.

Um dies Gesetz durch den Versuch zu bestätigen, muß man die Zeit genau bestimmen, welche nöthig ist, damit ein Pendel mehrere hundert Schwingungen macht. Macht man diese Beobachtung zu Anfang der Bewegung, wenn die Amplitude 2 bis 3^0 ist, später, wenn sie nur noch 1^0 beträgt, und zuletzt, wenn die Oscillationen so klein geworden sind, daß man sie mit der Lupe beobachten muß, so findet man, daß die Oscillationen in diesen drei Stadien wirklich isochron sind.

3) Die Schwingungsdauer zweier ungleich langer Pendel verhält sich wie die Quadratwurzel aus den Pendellängen.

Man denke sich den Schwingungsbogen ab eines Pendels in so viel gleiche Theile getheilt, daß man jedes dieser Bogentheilchen als geradlinig betrachten kann. Wenn nun der Ausschlagswinkel eines längeren Pendels eben so groß ist, so muß sich der Schwingungsbogen cd, Fig. 163, zum Schwingungsbogen ab verhalten wie die Pendellängen. Denken wir uns den Bogen dc in ebenso viel gleiche Theile getheilt wie den Bogen ab, so werden auch die einzelnen Theile im Verhältniß der Pendellängen stehen. Wenn also das eine Pendel viermal so lang ist als das andere, so werden auch jene Unterabtheilungen des Bogens dc viermal so groß sein als die entsprechenden Theile des Bogens ab. Der Winkel, welchen das oberste, das zweite, dritte u. s. w. Bogentheilchen von ab mit der Horizontalen macht, ist gleich dem Winkel, welchen das erste, zweite, dritte u. s. w. Bogentheilchen von cd mit derselben macht; auf den entsprechenden Theilen von ab und cd ist demnach auch die Beschleunigung dieselbe.

Fig. 163.

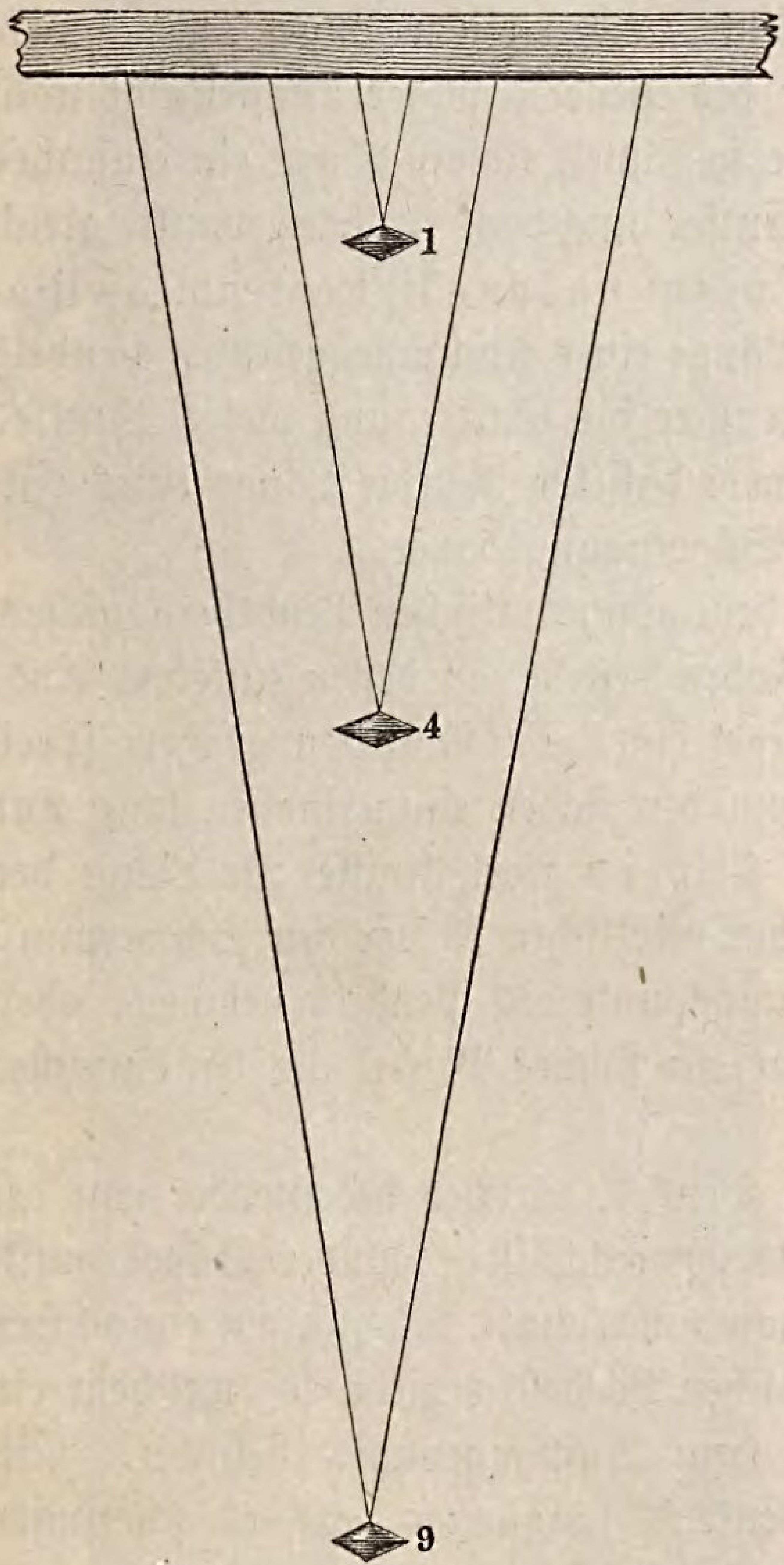


Wenn aber verschiedene Wege mit gleicher beschleunigender Kraft durchlaufen werden, so lehrt uns die Formel $s = \frac{g}{2} t^2$, daß sich die Fallzeiten verhalten wie die Quadratwurzeln der Fallräume. Wenn also jedes der Theilchen von cd 2-, 3-, 4-, n mal so groß ist als das entsprechende Theilchen von ab, so wird die Zeit, in welcher ein Theilchen von cd durchfallen wird, auch $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, $\sqrt{4}$, $\sqrt{n}$ mal so groß sein als die, in welcher das entsprechende Theilchen von ab durchlaufen wird. Da dies aber für alle Theilchen gilt, so gilt es auch für ihre Summe, was denn mit anderen Worten heißt: die Schwingungsdauer ist der Quadratwurzel aus der Pendellänge proportional.

Um die Richtigkeit des dritten Gesetzes durch den Versuch nachzuweisen,

nehme man drei Pendel von verschiedener Länge. Wenn sich z. B. die Pendellängen wie die Zahlen 1, 4, 9 verhalten, so verhalten sich die entsprechenden Schwingungszeiten wie die Zahlen 1, 2, 3. Am bequemsten hängt man zu diesem Versuche die Kugeln an einem doppelten Faden auf, wie Fig. 164 zeigt. Während ein Pendel, dessen Länge 40 cm ist, eine Oscillation macht, macht das viermal kürzere Pendel zwei Oscillationen; und während ein Pendel von 10 cm Länge dreimal hin und her geht, macht ein 90 cm langes nur einen Hin- und Hergang.

Fig. 164.



Die Beziehung zwischen der Pendellänge l und der Schwingungsdauer t ist ausgedrückt durch die Gleichung

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wo g die Beschleunigung der Schwere bezeichnet. Eine elementare Entwickelung dieser Gleichung findet man im mathematischen Supplementband, eine noch einfachere in der 8. Auflage des Lehrbuchs der Physik. Hat man durch genaue Versuche die Schwingungsdauer t eines einfachen Pendels gefunden, dessen Länge l man gemessen hat, so kann man nach Gleichung 1) den Werth von g berechnen. Auf diese Weise ergiebt sich $g = 9{,}809$ m.

Die Länge eines einfachen Pendels, welches Secunden schlägt, beträgt 994 mm.

Das materielle Pendel. 76

Die im vorigen Paragraphen entwickelten Gesetze gelten nur für das mathematische, nicht für das materielle Pendel, bei welchem der gewichtlose Faden durch einen beliebig geformten schweren Stab ersetzt ist, an dem eine oder mehrere schwere Massen von namhafter Ausdehnung hängen. Ein gewichtloser und unbiegsamer Faden, an welchem sich nur zwei materielle Punkte m und n befinden, würde schon ein materielles Pendel sein. Der schwere Punkt m, Fig. 165, welcher dem Aufhängepunkte näher ist als n, würde für sich allein schneller schwingen als n; weil aber die beiden materiellen Punkte verbunden sind, so wird m die Bewegung von n beschleunigen, und umgekehrt wird n die Bewegung von m verzögern; die Schwingungen werden deshalb mit einer Geschwindigkeit vor sich gehen, welche zwischen den Geschwindigkeiten liegt

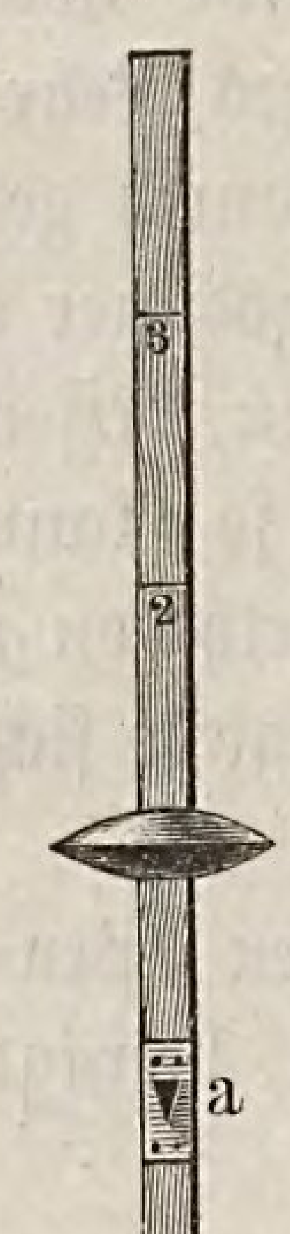
mit welchen jeder der Punkte m und n für sich allein schwingen würde. Die Schwingungsdauer des zusammengesetzten Pendels, Fig. 165, ist gleich der eines einfachen, welches länger ist als fm und kürzer als fn. Eben so verhält es sich mit jedem materiellen Pendel. Diejenigen Theile des Pendels nämlich, welche dem Aufhängungspunkte näher liegen, sind in ihrer Bewegung durch die entfernteren verzögert, die entfernteren aber durch die näheren beschleunigt. Es muß demnach auch für jedes zusammengesetzte Pendel einen Punkt geben, welcher durch die übrige Masse des Pendels weder beschleunigt noch verzögert ist, der also gerade so schnell schwingt wie ein einfaches Pendel, dessen Länge seiner Entfernung vom Aufhängepunkte gleich ist. Dieser Punkt heißt Schwingungspunkt, Centrum oscillationis. Wenn man von der Länge eines zusammengesetzten Pendels spricht, so versteht man darunter die Entfernung dieses Punktes vom Aufhängepunkte oder, was dasselbe ist, die Länge eines einfachen Pendels von gleicher Schwingungsdauer.

Fig. 165.



Am meisten nähert sich dem mathematischen Pendel ein solches, welches aus einem dünnen Faden besteht, an dessen unterem Ende eine Kugel oder ein Doppelkegel einer Substanz von großem specifischen Gewicht hängt. Wenn der Faden einigermaßen lang und der Durchmesser der Kugel klein im Verhältnisse zur Länge des Pendels ist, so kann man ohne merklichen Fehler den Schwerpunkt der Kugel für den Schwingungspunkt des Pendels nehmen, oder, mit anderen Worten, man darf ein solches Pendel als ein einfaches betrachten.

Fig. 166.

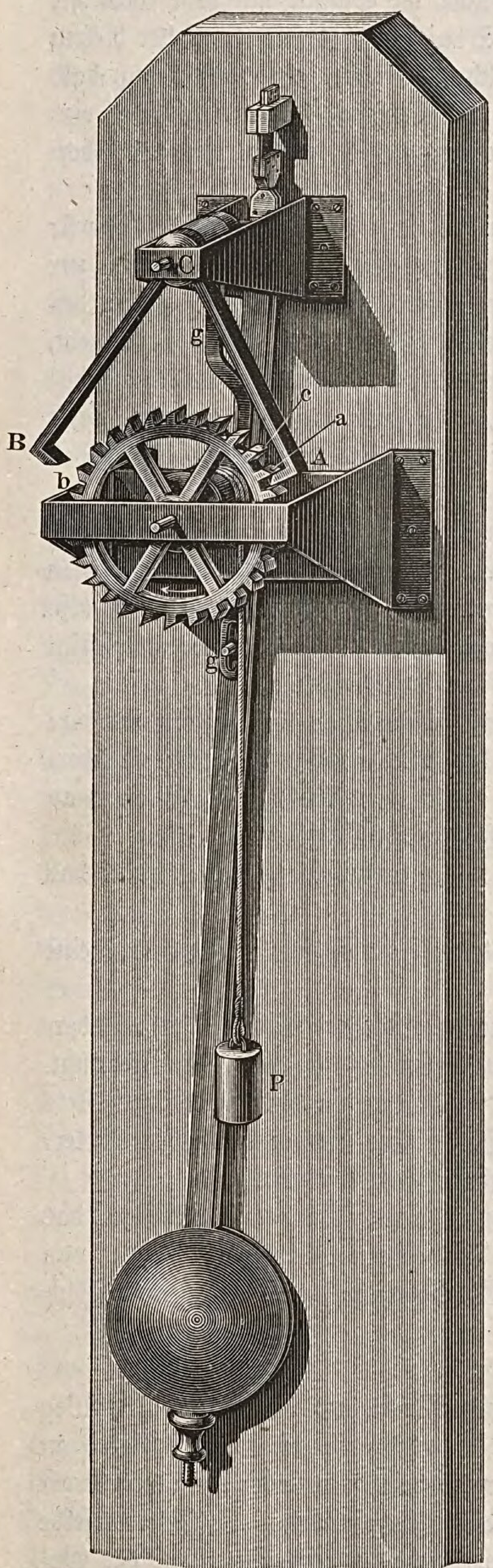


$\frac{1}{15}$

Bei jedem materiellen Pendel, welches bedeutender von der Form eines einfachen Pendels abweicht, ist jedoch der Schwerpunkt durchaus nicht mehr der Schwingungspunkt, wie sich am einfachsten aus der Betrachtung eines solchen Pendels ergiebt, bei welchem ein Theil der Masse sich über dem Aufhängepunkte befindet. Ein solches Pendel schwingt bedeutend langsamer, als es schwingen würde, wenn sein Schwerpunkt der Schwingungspunkt wäre.

Fig. 166 stellt einen geraden eingetheilten Stab vor, welcher in der Mitte mit einer Schneide a versehen ist, wie die, welche den Drehpunkt eines Wagbalkens bildet. Wenn man nun 1 dm unter und 1 dm über dieser Schneide eine Bleilinse, jede etwa zwei Pfund schwer, befestigt und die Schneide auf ihre Unterlage aufsetzt, so ist die Stange mit ihren Linsen c und d im Zustande des indifferenten Gleichgewichts, denn der Schwerpunkt des Systems fällt mit dem Drehpunkte zusammen. Sobald man aber am unteren Ende des Stabes ein kleines Uebergewicht b anbringt, so ist das Ganze ein Pendel. Die Schwingungen dieses Pendels sind aber selbst noch langsamer als die Schwingungen eines einfachen Pendels von der Länge ab; denn die einzige Kraft, welche das ganze System in Bewegung

Fig. 167.



setzt, ist die Schwere des untersten Bleigewichts *b*; dieses hat aber nicht allein seine eigene Masse in Bewegung zu setzen, wie es bei einem einfachen Pendel der Fall gewesen wäre, sondern es hat auch noch die Masse der Linsen bei *c* und *d* zu bewegen.

Es erklärt sich hieraus, warum ein Wagbalken, den man ebenfalls als ein Pendel betrachten kann, so langsam schwingt, obgleich sich sein Schwerpunkt ganz nahe unter dem Aufhängepunkte befindet, er also sehr schnell schwingen müßte, wenn der Schwerpunkt wirklich der Schwingungspunkt wäre.

Die Pendeluhr. Die wichtigste Anwendung, die man vom Pendel gemacht hat, ist die Regulirung der Uhren. 77
In jeder Uhr muß eine Kraft wirken, welche die Bewegung hervorbringt und erhält. Nun aber ist aus dem, was über die bewegenden Kräfte gesagt wurde, klar, daß, wenn der bewegenden Kraft nicht eine andere gleiche Kraft oder ein Bewegungshinderniß entgegenwirkt, die Bewegung nicht gleichförmig bleiben kann, sondern daß sie, wie bei einem fallenden Körper, schneller und schneller wird. Bei unseren Wanduhren ist die bewegende Kraft ein Gewicht, welches an einer um eine horizontale Axe geschlungenen Schnur hängt. Wenn das Gewicht durch seine Schwere hinabsinkt, so wird die Axe mittelst der Schnur umgedreht und dadurch das ganze Uhrwerk in Bewegung gesetzt. Die Bewegung eines fallenden Gewichtes ist aber eine beschleunigte, folglich würde auch die Uhr anfangs langsam, dann schneller und schneller gehen müssen, wenn ihr Gang nicht regulirt würde, und diese Regulirung wird eben durch das Pendel bewirkt.

Wie das Pendel den Gang einer Uhr reguliren könne, ist aus Fig. 167 (a. v. S.) ersichtlich. An der Axe, um welche die Schnur mit dem Gewichte geschlungen ist, ist ein gezahntes Rad, das Steigrad, befestigt. Ueber diesem Rade befindet sich ein Anker ACB, welcher je nach seiner Stellung bald auf der einen, bald auf der anderen Seite zwischen die Zähne des Rades eingreift. Dieser Anker wird durch Schwingungen des Pendels hin- und hergeführt.

Die Figur stellt das Pendel gerade in der Lage dar, wo es seine äußerste Stellung links hat. Das Rad, welches durch das Gewicht von der Linken zur Rechten gedreht wird, kann sich aber nicht bewegen, weil der Zahn a durch den Arm A des Ankers aufgehalten wird. Sobald jedoch das Pendel zurückgeht, geht A auf die Seite, und der Zahn a wird vorbeigelassen; die Bewegung des Rades wird aber sofort wieder gehemmt, weil nun auf der anderen Seite der Arm B des Ankers niedergeht, und an diesem dann der Zahn b des Rades anstößt.

Geht nun das Pendel abermals nach der Linken, so wird der Zahn c durch A angehalten. Bei jedem Hin- und Hergange geht also das Rad um einen Zahn, somit bei jedem Pendelschlage um eine halbe Zahnweite voran. Hat also das Rad 30 Zähne, so wird ein Zeiger, welcher an der Axe desselben befestigt ist, in 60 Sprüngen den ganzen Kreisumfang durchlaufen.

Die Axe des Ankers bildet jedoch nicht unmittelbar die Schwingungsaxe des Pendels, weil dieses, in Zapfen sich bewegend, zuviel Reibung zu überwinden hätte. Das Pendel ist vielmehr hinter dem Anker mittelst eines an dem Träger desselben eingeklemmten Stückchens einer Uhrfeder aufgehängt. An dem Anker aber ist eine Gabel g befestigt, die mittelst eines Stiftes durch das Pendel geführt wird, wie die Figur zeigt.

Eine solche, durch Fig. 167 erläuterte Vorrichtung nennt man eine Hemmung oder ein Echappement.

Das Pendel hat bei seinen Oscillationen verschiedene Widerstände zu überwinden, weshalb es allmälig zur Ruhe kommt, wenn es für sich allein schwingt. Im Uhrwerk wird nun aber dem Pendel sein Bewegungsverlust dadurch stets wieder ersetzt, daß der Zahn, an der schiefen Fläche des austretenden Ankerarms hinschleifend, diesem eine kleine Beschleunigung mittheilt.

Bei Taschenuhren ist das Gewicht durch eine gespannte Stahlfeder, das Pendel aber durch die Unruhe ersetzt, d. h. durch einen Metallring, welcher von einer vermöge ihrer Elasticität um ihre Gleichgewichtslage schwingenden Spiralfeder hin- und herbewegt wird.

78 **Arbeit einer Kraft.** Wenn eine Kraft durch einen gewissen Weg hindurch so auf einen Körper wirkt, daß sie die Größe seiner Geschwindigkeit zu ändern sucht, so sagt man, die Kraft leiste eine Arbeit. Nun aber kann eine Kraft in Bezug auf die Geschwindigkeit auf zweierlei Art einwirken; sie kann dieselbe entweder zu vermehren, oder zu vermindern suchen. Eine Zunahme der Geschwindigkeit sucht eine Kraft zu bewirken, wenn ihre Richtung mit der Richtung

der Bewegung zusammenfällt oder wenigstens mit ihr einen spitzen Winkel bildet. In diesem Falle also wirkt die Kraft als bewegende Kraft, und man nennt demgemäß die von ihr geleistete Arbeit Arbeit der bewegenden Kraft. Eine Abnahme der Geschwindigkeit sucht dagegen eine Kraft dann zu bewirken, wenn ihre Richtung der Bewegungsrichtung entgegengesetzt ist oder wenigstens mit ihr einen stumpfen Winkel bildet. In diesem Falle wirkt die Kraft als Widerstand, und man nennt demgemäß die von ihr geleistete Arbeit Widerstandsarbeit.

Beim freien Fall wirkt die Schwerkraft oder das Gewicht des fallenden Körpers in der Richtung der Bewegung; beim schief abwärts gerichteten Wurf bildet ihre Richtung mit der Richtung der Bewegung einen spitzen Winkel. In beiden Fällen wirkt die Schwerkraft als bewegende Kraft und die von ihr geleistete Arbeit besteht in der stetigen Vermehrung der Geschwindigkeit des fallenden oder des geworfenen Körpers.

Beim vertical aufwärts gerichteten Wurf wirkt die Schwerkraft in der entgegengesetzten Richtung der Bewegung; bei schief aufwärts gerichtetem Wurf bildet ihre Richtung mit der Bewegungsrichtung einen stumpfen Winkel. In beiden Fällen wirkt die Schwerkraft als Widerstand und die von ihr geleistete Widerstandsarbeit besteht in der stetigen Verminderung der Geschwindigkeit des geworfenen Körpers.

Beim gleichförmigen Heben einer Last wirken zwei Kräfte, nämlich: die bewegende Kraft, welche die Hebung bewirkt, mit der Bewegung gleiche Richtung hat und die Geschwindigkeit der Last zu vermehren sucht, und der Widerstand, welcher im Gewichte der Last besteht, die entgegengesetzte Richtung der Bewegung hat und die Geschwindigkeit zu vermindern sucht. Die Arbeit der bewegenden Kraft bringt jedoch keine Vermehrung, die des Widerstandes keine Verminderung der Geschwindigkeit hervor, sondern die Arbeitsleistung einer jeden Kraft besteht darin, der anderen das Gleichgewicht zu halten, d. h. zu verhüten, daß die Geschwindigkeit durch die andere geändert wird.

Eine Kraft, deren Richtung senkrecht zur Bewegungsrichtung steht, wie z. B. der Druck gegen die schiefe Ebene oder die Centripetalkraft der kreisförmigen Bewegung, wird immer durch eine gleich große Gegenkraft aufgehoben; sie vermag daher die Geschwindigkeit weder zu vermehren noch zu vermindern und kann deshalb auch keine Arbeit leisten.

Die Größe der von einer Kraft geleisteten Arbeit richtet sich nach der Größe der Kraft, nach der Größe des Wegs, welchen der Angriffspunkt der Kraft zurücklegt und endlich nach der Größe des Winkels, welchen Kraft und Bewegungsrichtung miteinander bilden.

Für den Fall, daß Kraft und Weg dieselbe Richtung haben, ist die von der Kraft geleistete Arbeit der Größe der Kraft und der Länge des Wegs direct proportional. Um die Richtigkeit dieses Satzes einzusehen, bedenke man zuerst, daß wer dieselbe Arbeit 2, 3, 4 ... mal verrichtet, auch die 2, 3, 4 .... fache Arbeit leistet. Hebt nun Jemand eine Last von 2, 3, 4 ..... Kilogramm auf eine gewisse Höhe, so leistet er offenbar dieselbe Arbeit, als wenn er 1 Kilogramm 2, 3,

4 . . . . mal auf dieselbe Höhe heben würde; er leistet also auch eine 2, 3, 4 . . . . mal größere Arbeit, wie wenn er nur 1 kg auf die gleiche Höhe hebt. Die geleistete Arbeit ist somit der Größe der Kraft proportional. — Nehmen wir ebenso an, es werde eine gewisse Last auf eine Höhe von 2, 3, 4 . . . m gehoben, so wird offenbar dieselbe Arbeit geleistet, als wenn dieselbe Last 2, 3, 4 . . . mal auf die Höhe von 1 m gehoben würde; es wird also auch eine 2, 3, 4 . . . mal größere Arbeit geleistet, wie wenn dieselbe Last auf die Höhe von 1 m gehoben wird. Die geleistete Arbeit ist somit auch der Größe des vom Angriffspunkte zurückgelegten Weges proportional.

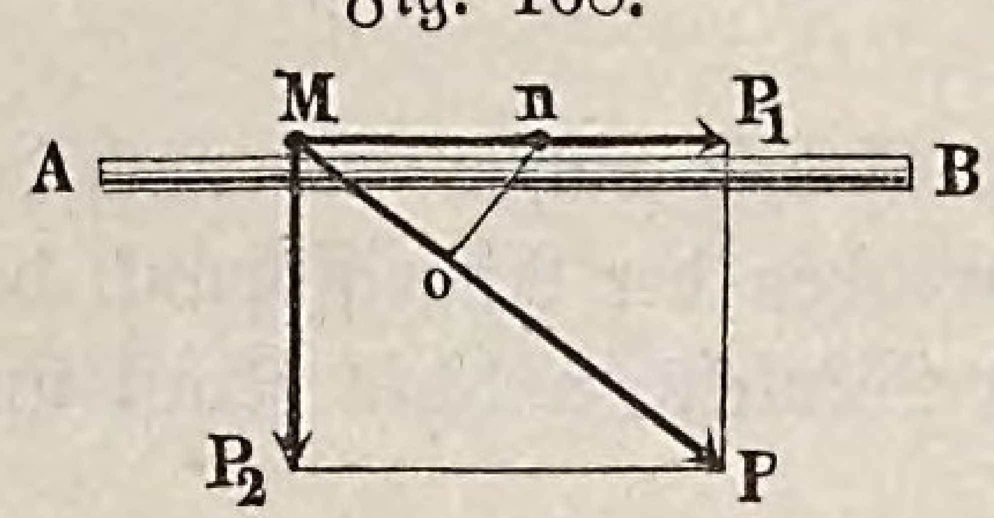
Als Einheit des Arbeitsmaaßes nimmt man diejenige Arbeit an, welche geleistet wird, wenn eine Kraft von 1 kg durch einen (in ihre Richtung fallenden) Weg von 1 m hindurch wirksam ist; diese Arbeit nennt man 1 Kilogrammmeter oder auch 1 Meterkilogramm. Demnach ist, wenn eine Kraft von P Kilogramm durch einen Weg von 1 m hindurch wirkt, die geleistete Arbeit P Kilogrammmeter und ebenso, wenn dieselbe Kraft durch einen Weg von s Metern hindurch wirkt, ist die geleistete Arbeit $P \,.\, s$ Kilogrammmeter. Bezeichnet man die geleistete Arbeit mit A, so hat man demzufolge

$$A = P \,.\, s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

d. h. haben Kraft und Weg des Angriffspunktes dieselbe Richtung, so findet man die von der Kraft geleistete Arbeit, wenn man die Kraft mit dem Wege des Angriffspunktes multiplicirt.

Ganz dasselbe Resultat erhält man, wenn Kraft und Weg des Angriffspunktes die entgegengesetzte Richtung haben; ein Unterschied liegt indessen darin, daß, wenn man auf die Richtungs- oder mathematischen Vorzeichen Rücksicht nimmt, die Arbeit der bewegenden Kräfte positiv ist, weil Kraft und Weg gleichgerichtet sind, also auch gleiche Vorzeichen haben, die Arbeit der Widerstände dagegen negativ ist, da Widerstand und Weg entgegengesetzte Richtung, also auch entgegengesetzte Vorzeichen haben. Aus diesem Grunde bezeichnet man auch die Arbeit der bewegenden Kräfte als positive, dagegen die Arbeit der Widerstände als negative Arbeit.

Fig. 168.



Bildet die Richtung der Kraft MP mit dem Wege Mn des Angriffspunktes M einen Winkel, so findet man die Arbeit der Kraft, indem man dieselbe durch zwei Seitenkräfte ersetzt, von denen die eine MP in die Richtung des Weges fällt, während die andere MP_2 darauf senkrecht steht. Letztere bringt, weil sie auf dem Wege senkrecht steht, keine Arbeit hervor; demnach ist die Arbeit A, welche die Kraft MP leistet, gleich derjenigen, welche die Kraft MP_1 leistet. Da aber diese Kraft in die Richtung des Weges fällt, so ist ihre Arbeit gleich $MP_1 \,.\, Mn$; somit hat man auch

$$A = MP_1 \,.\, Mn \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

MP_1 wird die Projection [1]) der Kraft auf die Richtung des Weges genannt. Man findet somit die Arbeit einer Kraft, welche mit dem Wege des Angriffspunktes einen Winkel bildet, wenn man die Projection der Kraft auf die Richtung des Weges mit dem Wege des Angriffspunktes multiplicirt. Haben Weg und Projection der Kraft gleiche Richtung, so ist die Arbeit positiv; haben sie aber entgegengesetzte Richtung, so ist die Arbeit negativ.

Der eben bewiesene Satz läßt sich auch noch anders ausdrücken. Projicirt man nämlich den Weg Mn des Angriffspunktes auf die Richtung der Kraft MP, indem man no senkrecht auf MP zieht, so ist das dadurch entstandene Dreieck Mno ähnlich mit dem Dreieck MPP_1, und es verhält sich

$$MP_1 : MP = Mo : Mn.$$

Hieraus folgt

$$MP_1 \,.\, Mn = MP \,.\, Mo,$$

somit ist auch

$$A = MP \,.\, Mo \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

d. h. bildet die Richtung der Kraft mit dem Wege des Angriffspunktes einen Winkel, so findet man auch die Arbeit, wenn man die Kraft mit der Projection des Weges auf die Richtung der Kraft multiplicirt.

In vielen Fällen ist es richtig, die Arbeit zu kennen, welche eine Kraft während einer Zeiteinheit, also während einer Secunde, leisten kann; diese Arbeitsleistung wird Effect genannt. So beträgt der Effect eines Menschen zwischen 7 und 12 Kilogrammmeter, der eines Pferdes zwischen 40 und 75 Kilogrammmeter. Der Effect von 75 Kilogrammmeter wird auch Pferdekraft genannt; durch dieses Maaß wird gewöhnlich der Effect der Maschinen ausgedrückt. Wenn man also sagt, eine Dampfmaschine habe eine Stärke von 20 Pferdekräften, so heißt das, sie vermag secundlich eine Arbeit von 20 . 75 = 1500 Kilogrammmeter zu leisten.

Princip der virtuellen Geschwindigkeiten. Da die Arbeit der bewegenden Kräfte die Geschwindigkeit des Körpers, auf den sie wirken, zu vermehren, die Arbeit der Widerstände dagegen diese Geschwindigkeit zu vermindern sucht, so ist klar, daß die Geschwindigkeit des Körpers sich nicht ändert und der Körper sich somit im Gleichgewichte oder im Beharrungszustande befindet, wenn die Arbeit der bewegenden Kräfte gleich ist der Arbeit der Widerstände. 79

Mittelst dieses Satzes gelangt man in der Regel am schnellsten zum Ziele, wenn es sich darum handelt, die Bedingung des Gleichgewichts eines in Bewe-

[1]) Eine Strecke auf eine gegebene Richtung projiciren heißt, von den Endpunkten der Strecke Senkrechte auf die gegebene Richtung fällen; der zwischen den beiden Senkrechten auf der Richtung liegende Abschnitt heißt die Projection der Strecke auf die Richtung.

gung befindlichen Körpers zu finden. Er läßt sich jedoch auch auf ruhende Körper anwenden, wenn man denselben eine virtuelle, d. i. gedachte Bewegung beilegt. Aus letzterem Grunde nennt man diesen Satz gewöhnlich das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten. Nachfolgende Beispiele mögen zur Erläuterung desselben dienen.

Der Flaschenzug. Denken wir uns die Last Q des Flaschenzuges Fig. 12 werde um die Strecke s gehoben, so ist die negative Arbeit der Schwere gleich $Q \,.\, s$. Bei dieser Hebung verkürzt sich jedes der 6 Seilstücke, durch welche die beiden Flaschen miteinander verbunden sind, gleichfalls um s; dann aber verlängert sich das Seilstück, an welchem die Kraft P wirkt, um $6s$; die positive Arbeit der bewegenden Kraft ist daher $P \,.\, 6s$. Nach dem Princip der virtuellen Geschwindigkeiten findet aber Gleichgewicht Statt, wenn

$$P \,.\, 6s = Qs$$

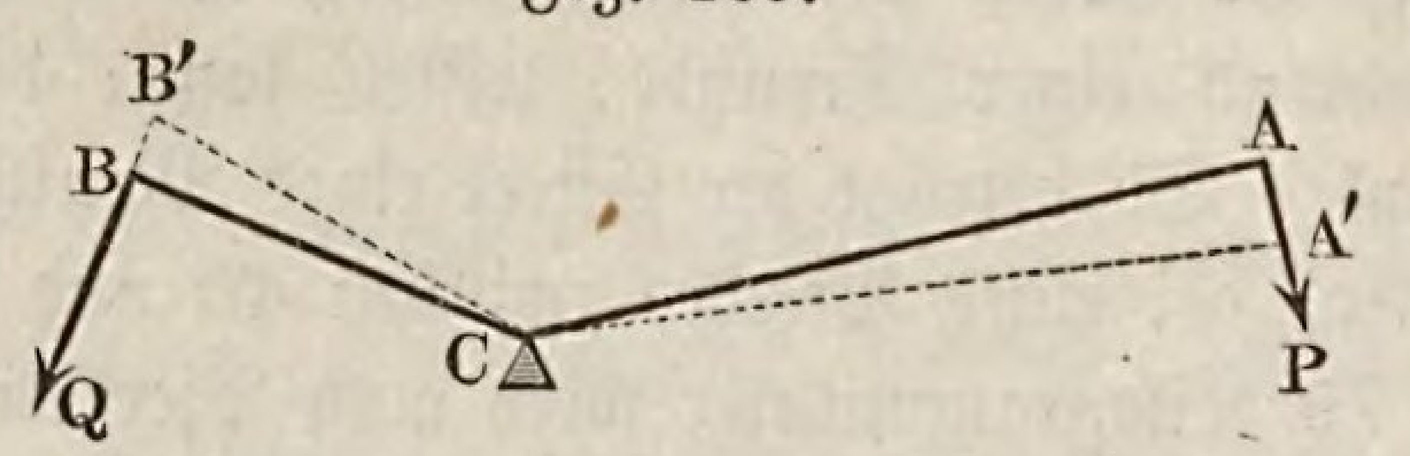
oder wenn

$$P = \frac{1}{6} Q$$

ist, was mit dem Ergebniß der früheren Untersuchung übereinstimmt.

Der Hebel. Um die Bedingung des Gleichgewichts am Hebel zu finden, verlege man zuerst die Angriffspunkte der Kraft P und der Last Q in die Endpunkte der Hebelarme AC und BC (Fig. 169) und ertheile dem Hebel im Sinne der Kraft P eine kleine virtuelle Drehung um seinen Unterstützungspunkt, so daß die Angriffspunkte A und B die kleinen Kreisbögen AA' und BB' beschreiben, welche in die Richtung von Kraft und Last fallen.

Fig. 169.



Alsdann ist die positive Arbeit der Kraft gleich $P \,.\, AA'$, die negative der Last dagegen $Q \,.\, BB'$; somit findet Gleichgewicht Statt, wenn

$$P \,.\, AA' = Q \,.\, BB'$$

ist, oder wenn

$$P : Q = BB' : AA'.$$

Nun haben aber die Bögen BB' und AA' gleiche Centriwinkel, sie verhalten sich daher wie ihre Radien BC und AC; man hat demnach

$$BB' : AA' = BC : AC,$$

folglich auch

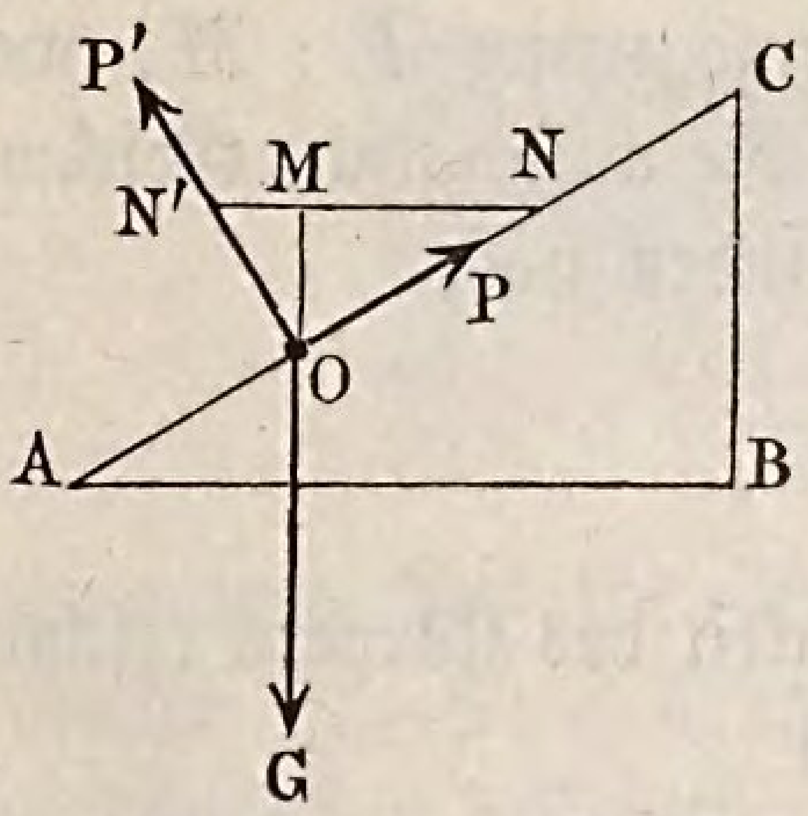
$$P : Q = BC : AC,$$

die bekannte Proportion, welche die Bedingung des Gleichgewichts am Hebel angiebt.

Die schiefe Ebene. Im Punkte O der schiefen Ebene ABC (Fig. 170) befinde sich die Last $OG = G$, auf welche parallel mit der Länge die Kraft $OP = P$ und senkrecht zur Länge der Druck $OP' = P'$ der schiefen Ebene wirke. Um die Bedingung des Gleichgewichts zu finden, ertheile man dem Angriffspunkt O die virtuelle Bewegung ON; dabei leistet die Kraft P die

positive Arbeit $P . ON$, die Last G dagegen die negative Arbeit $G . OM$, wenn OM die Projection des Weges ON auf die Richtung der Last OG ist; der Druck P' endlich leistet die Arbeit Null, da er senkrecht zur Bewegungsrichtung steht. Nach dem Princip der virtuellen Geschwindigkeiten findet nun Gleichgewicht Statt, wenn

Fig. 170.



$$P . ON = G . OM$$

oder wenn

$$P : G = OM : ON$$

ist. Nun sind aber die Dreiecke MON und ABC ähnlich und es verhält sich demzufolge

$$OM : ON = BC : AC.$$

Hieraus geht aber hervor, daß auch Gleichgewicht auf der schiefen Ebene stattfindet, wenn sich

$$P : G = BC : AC$$

verhält, welches die bekannte Gleichgewichtsbedingung ist.

Das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten eröffnet noch einen tiefen Einblick in das Wesen der Maschinen. Mittelst der Maschinen ist man bekanntlich im Stande mit einer kleinen Kraft einen großen Widerstand zu überwinden, allein die Maschine kann nur dann im gleichförmigen Gange bleiben, wenn die Arbeit der bewegenden Kräfte gleich ist der Arbeit der Widerstände. Mit einer kleinen bewegenden Kraft kann also die Maschine nur dann einen großen Widerstand überwinden, wenn die Kraft durch einen großen, der Widerstand dagegen durch einen kleinen Weg hindurch wirksam ist; oder je kleiner die Kraft desto größer der Weg. — Aus der Gleichheit der Arbeiten der bewegenden Kräfte und der Widerstände geht noch hervor, daß eine Maschine keine Arbeit zu schaffen vermag und es daher unmöglich ist ein „Perpetuum mobile“, d. i. eine Maschine zu construiren, welche einmal in Bewegung gesetzt, nicht aufhört sich zu bewegen oder sogar noch im Stande ist, eine nützliche Arbeit zu leisten.

Lebendige Kraft. Ein Körper, welcher sich in Bewegung befindet, 80
kann nur dadurch zur Ruhe kommen, daß äußere Kräfte seiner Bewegung einen Widerstand entgegensetzen, den der Körper durch eine gleich große Gegenkraft einen gewissen Weg hindurch überwindet. Ein bewegter Körper ist demnach im Stande eine positive Arbeit zu leisten, er besitzt eine gewisse Arbeitsfähigkeit und kann daher als ein Arbeitsmagazin betrachtet werden.

Ein bewegter Körper, der einen gleichmäßig wirkenden Widerstand zu überwinden hat, wird, bis er zur Ruhe gelangt, noch einen um so größeren Weg zurücklegen, je kleiner der zu überwindende Widerstand und je größer die Masse und die Geschwindigkeit des Körpers ist. Angenommen die Arbeitsfähigkeit des Körpers, vermöge deren er den Widerstand P durch den Weg s zu überwinden vermag, sei L, so ist der Körper im Stande, die Kraft P

durch den Weg s hindurch auszuüben oder die positive Arbeit $P \,.\, s$ zu leisten. Man hat also

$$L = P \,.\, s \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

Wenn aber dem Körper ein Widerstand P entgegenwirkt, so nimmt derselbe eine gleichförmig verzögerte Bewegung an mit der Verzögerung $P : M$, wenn M die Masse des Körpers ist. Bezeichnet man daher die anfängliche Geschwindigkeit des Körpers mit c, so ist dieselbe nach t Secunden noch

$$c - \frac{P}{M} t,$$

und ist t die Zeit, nach welcher die ganze Arbeitsfähigkeit des Körpers erschöpft, also seine Geschwindigkeit gleich Null ist, so hat man

$$c - \frac{P}{M} t = o$$

und somit auch

$$t = \frac{Mc}{P}.$$

Der Weg s, den der Körper bei Ueberwindung des Widerstandes P durchläuft, ist gleich dem Unterschiede der Wege, die er vermöge seiner ursprünglichen Geschwindigkeit c und seiner Verzögerung $P : M$ in der Zeit t zurücklegen würde. Demnach ist

$$s = ct - \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{M} \cdot t^2.$$

Führt man den eben gefundenen Werth von t in diese Gleichung ein, so erhält man

$$s = c \,.\, \frac{Mc}{P} - \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{M} \cdot \frac{M^2 c^2}{P^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Mc^2}{P};$$

hieraus aber ergiebt sich

$$P \,.\, s = \frac{1}{2} Mc^2 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

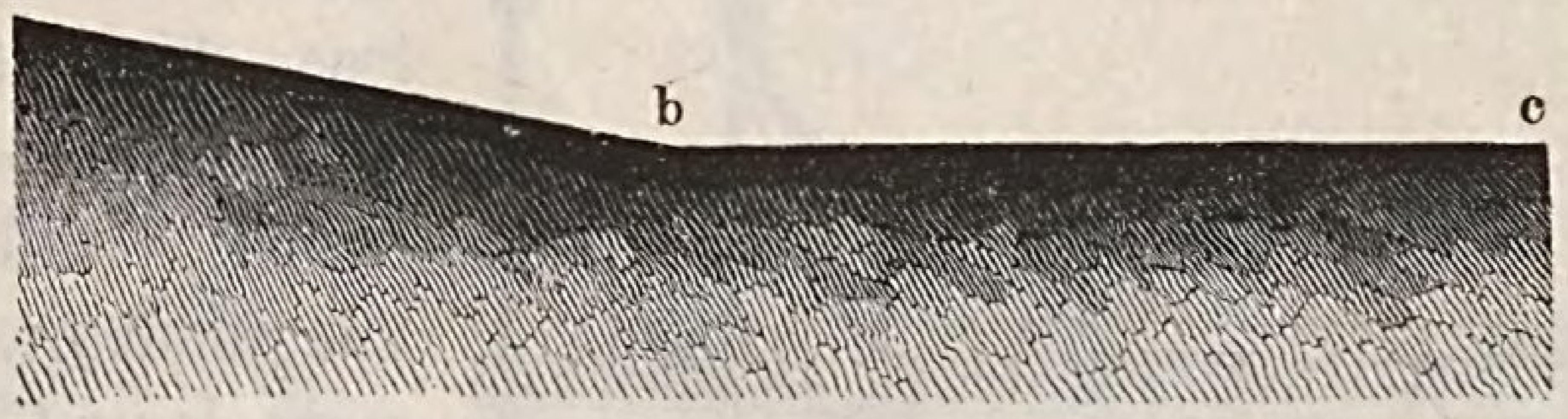
Die linke Seite dieser Gleichung drückt den Werth der Arbeitsfähigkeit des Körpers aus; die rechte Seite dagegen stellt das halbe Product aus der Masse des Körpers in das Quadrat seiner Geschwindigkeit vor und wird als die lebendige Kraft des Körpers bezeichnet. Der entwickelte Satz lautet demnach: Die Arbeitsfähigkeit eines Körpers ist gleich seiner lebendigen Kraft.

Gesetzt eine 3 kg schwere Kugel besitze eine Geschwindigkeit von 100 m, so ist dieselbe im Stande eine positive Arbeit von $\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{9{,}80} \cdot 10000 = 1530$ Kilogrammmeter zu verrichten.

Eine Eisenbahn bilde von a bis b, Fig. 171, eine schiefe Ebene, von b bis c aber laufe sie horizontal fort. Der Bahnzug komme auf der schiefen Ebene herabrollend bei b mit einer Geschwindigkeit von 8 m an, so ist leicht

zu berechnen, wie weit er noch auf der horizontalen Bahn fortrollen wird, bis er zur Ruhe kommt, wenn man weiß, daß die Reibung $^1/_{300}$ der Last beträgt.

Fig. 171.



Angenommen das Gewicht des Bahnzuges sei G, so ist der Widerstand auf der Bahn $^1/_{300}\,G$, und, wenn der Zug noch den Weg s zurücklegen kann, die Arbeitsfähigkeit desselben $^1/_{300}\,.\,G\,.\,s$. Die Masse des Bahnzugs aber ist $\frac{G}{9{,}80}$ und seine lebendige Kraft $\frac{1}{2}\cdot\frac{G}{9{,}8}\cdot 8^2$. Nach obigem Satze aber ist

$$\frac{1}{300}\cdot G\,.\,s = \frac{1}{2}\cdot\frac{G}{9{,}8}\cdot 8^2$$

und hieraus folgt $s = 980\,\mathrm{m}$; der Bahnzug wird also noch 980 m zurücklegen, bis er zur Ruhe kommt.

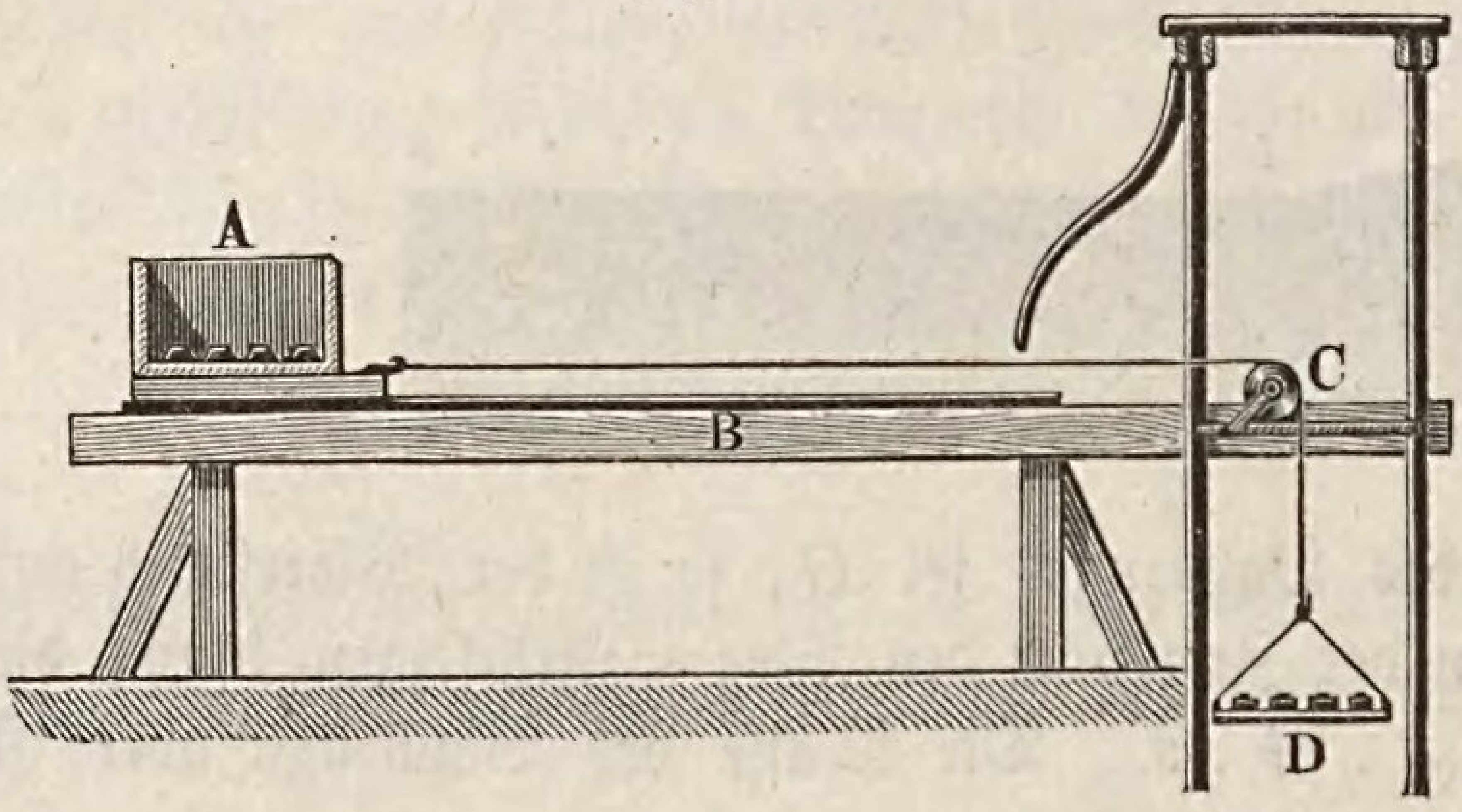
Hindernisse der Bewegung. Ein schon mehrfach besprochener 81
Widerstand, welcher fast auf alle Bewegungen einen bedeutenden Einfluß ausübt, ist die Reibung. Um eine nur einigermaßen große Last auf einer horizontalen Ebene fortzuschleifen, ist ein bedeutender Kraftaufwand nöthig, welcher lediglich von den Reibungswiderständen herrührt. Wären die Reibungswiderstände nicht vorhanden, so könnte die kleinste Kraft die größte Last auf horizontaler Ebene in Bewegung setzen, und einmal angestoßen, müßte sich die Last mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf der horizontalen Ebene fortbewegen.

Die Reibung rührt unstreitig daher, daß die Erhabenheiten der über einander hingleitenden Flächen gegenseitig in deren Vertiefungen eingreifen. Wenn nun Bewegung stattfinden soll, so müssen entweder die hervorragenden Theilchen von der Masse ihres Körpers abgerissen, oder der eine Körper muß fortwährend über die Unebenheiten des anderen hinweggehoben werden. Ersteres findet Statt, wenn die reibenden Flächen sehr rauh, letzteres, wenn sie mehr geglättet sind. Je glatter übrigens die reibenden Flächen sind, desto mehr Einfluß gewinnt die Adhäsion, welche namentlich bei Anwendung von flüssiger und halbflüssiger Schmiere von Bedeutung wird.

Um Versuche über gleitende Reibung anzustellen, wandte Coulomb (1736 bis 1806) den Fig. 172 (a. f. S.) dargestellten Apparat an. Ein Kästchen A, welches man nach Belieben mit Gewichten belasten kann, ruht auf zwei horizontalen Schienen, welche neben einander gelegt sind. Eine an dem Kästchen befestigte Schnur geht über eine Rolle C und trägt an ihrem freien Ende eine Wagschale D, auf welche so lange Gewichte zugelegt werden, bis dadurch das Kästchen A in Bewegung gesetzt wird.

Nehmen wir an, die untere Fläche des Kästchens sei durch eine eiserne Platte gebildet und die Schienen seien gleichfalls von Eisen und das Gewicht des Kästchens *A* sammt Allem, was darin liegt, betrage 25 Pfund, so ergiebt der Versuch, daß Bewegung eintritt, sobald das auf die Wagschale *D* aufgelegte Gewicht sammt dem Gewicht der Wagschale 7 Pfund beträgt. Die zur Ueberwindung der Reibung anzuwendende Kraft beträgt also in diesem Falle $^7/_{25}$ oder 28 Procent der Last.

Fig. 172.



Wäre das Gewicht des Kästchens *A* zweimal, dreimal so groß gewesen, so hätte an der Schnur auch eine doppelte, dreifache Kraft ziehen müssen, um die Reibung zu überwinden, und so ergiebt sich:

1) Die Reibung ist dem Drucke proportional, mit dem die Flächen, welche übereinander hergleiten sollen, aufeinander gedrückt werden.

Hätte man, ohne sonst etwas zu ändern, die eisernen Schienen breiter oder schmäler gemacht, so würde man doch immer zu demselben Resultate gekommen sein, d. h. zur Ueberwindung der Reibung würden immer 28 Procent der Last nöthig gewesen sein, und so ergiebt sich:

2) Die Reibung ist unabhängig von der Ausdehnung der reibenden Flächen.

Die Zahl, welche angiebt, der wievielte Theil der Last zur Ueberwindung der Reibung verwandt werden muß, wird Reibungscoëfficient genannt. Für Eisen auf Eisen ist dieser Coëfficient, wie wir gesehen haben, 0,28 oder genauer 0,277; der Reibungscoëfficient ändert sich jedoch mit der Natur der reibenden Flächen. Die folgende Tabelle enthält einige der in der Praxis wichtigsten Reibungscoëfficienten:

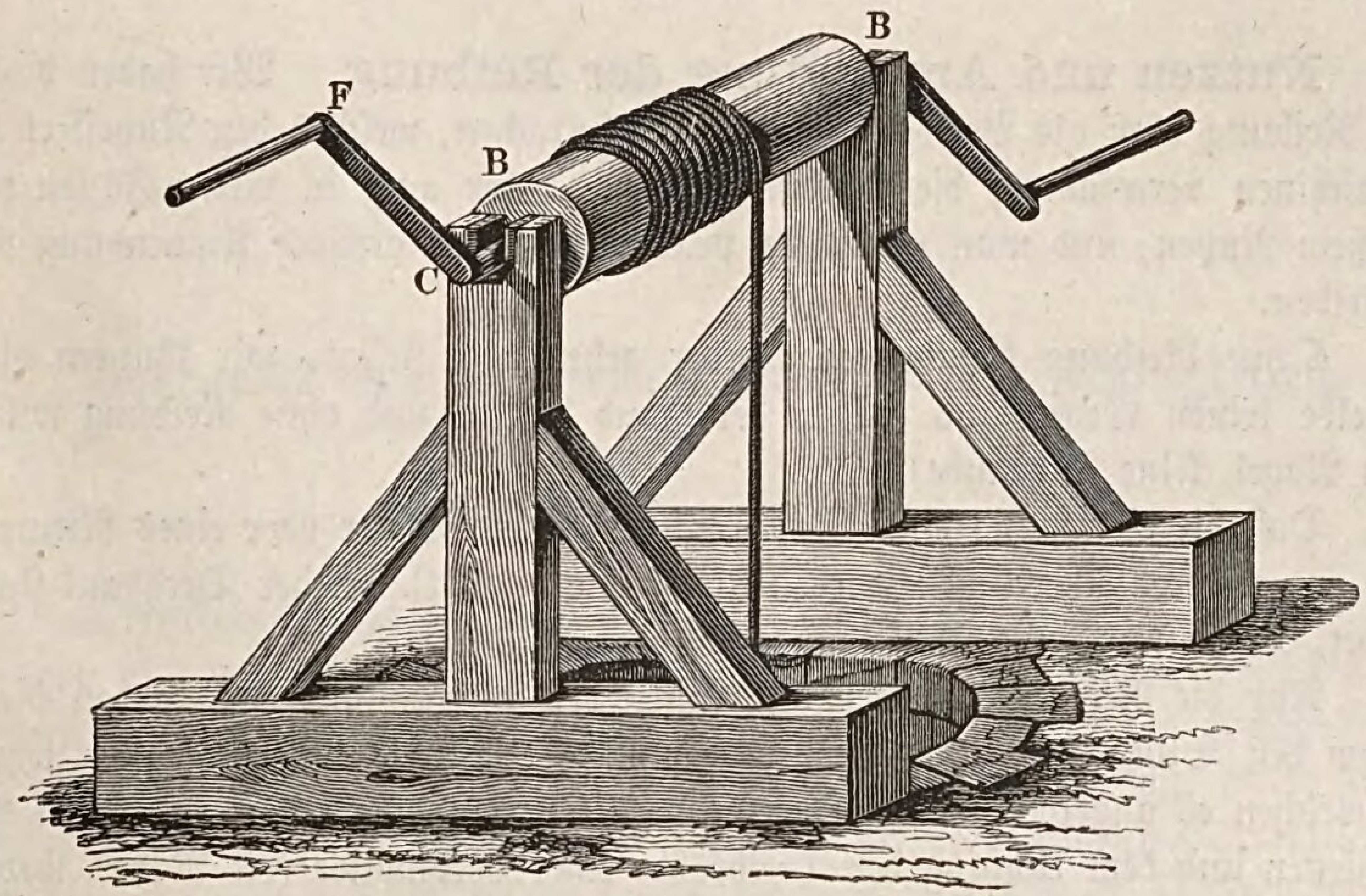
Eisen auf Eisen	0,277
Eisen auf Messing . . .	0,263
Eisen auf Kupfer . . .	0,170
Eichen auf Eichen . . .	0,418 = 0,273 +
Eichen auf Kiefern . . .	0,667
Kiefern auf Kiefern . . .	0,562

Durch eine zweckmäßige Schmiere kann der Reibungswiderstand noch verringert werden. Für Metalle ist Oel, für Holz hingegen Talg das beste Schmiermittel.

Bei Hölzern ist es nicht gleichgültig, wie die Fasern laufen; die Reibung ist nämlich bei gekreuzten Fasern (+) viel geringer als bei parallelen (=).

Gleitende Reibung findet unter Anderem auch überall da Statt, wo Zapfen in ihren Pfannen gedreht werden. Untersuchen wir z. B. die Wirkung der Reibung an dem schon öfter betrachteten Haspel (Fig. 173). Das Gewicht des Wellbaumes selbst mit Allem, was daran befestigt ist, betrage 75 Pfd., die zu

Fig. 173.



hebende Last wiege 100 Pfd., also die am Hebel F wirkende Kraft 25 Pfd., alsdann ist der Gesammtdruck, welchen die Zapfenlager auszuhalten haben, $75 + 100 + 25 = 200$ Pfd. Wenn die Zapfenlager von Messing, die Zapfen aber von Eisen sind, so beträgt der Reibungswiderstand, welcher am Umfange der Zapfen wirkt, 26,3 Proc.; die Wirkung der Reibung ist also dieselbe, als ob man statt ihrer um den Zapfen eine Schnur in derselben Richtung geschlungen hätte wie das Seil, welches die Last trägt, und an dieser Schnur ein Gewicht $200 \times 0{,}263$ oder 52,6 Pfd. angehängt hätte; oder als wenn die am Umfange des Wellbaums wirkende Last um $\frac{52{,}6}{5} = 10{,}5$ Pfd. größer gewesen wäre, vorausgesetzt nämlich, daß der Durchmesser des Zapfens $^1/_5$ vom Durchmesser des Wellbaumes ist. Es werden also bei diesem Haspel circa 10 Procent der angewandten Kraft für die Ueberwindung der Reibungswiderstände verzehrt.

Wenn ein Körper, welcher bis dahin sich auf seiner Unterlage in Ruhe befand, in Bewegung gesetzt werden soll, so ist die dabei zu überwindende Reibung etwas größer als diejenige, welche überwunden werden muß, wenn die Bewegung bereits eingeleitet ist.

Von der eben betrachteten gleitenden Reibung ist die wälzende Reibung zu unterscheiden, welche da stattfindet, wo ein runder Körper etwa eine Kugel, ein Cylinder, über die Unterlage hinwegrollt. Es kommt dabei die Unterlage stets mit neuen Punkten des rollenden Körpers in Berührung.

Der hierbei entstehende Widerstand ist bei Weitem geringer als der Widerstand der gleitenden Reibung.

Bei einem Wagenrade findet wälzende Reibung am Umfange des Rades, gleitende Reibung aber an den Axen Statt. Beide Widerstände werden um so geringer, je größer der Durchmesser der Räder ist.

82 **Nutzen und Anwendung der Reibung.** Wir haben bisher die Reibung bloß als Bewegungshinderniß betrachtet, welches den Nutzeffect der Maschinen vermindert; die Reibung ist uns aber auch in vielen Fällen von großem Nutzen, und man macht im praktischen Leben vielfach Anwendung von derselben.

Ohne Reibung könnten wir weder gehen noch stehen, wir könnten ohne dieselbe keinen Gegenstand fest in der Hand halten, und ohne Reibung würde kein Nagel, keine Schraube halten.

Daß die Bewegung eines Rades mittelst einer Schnur oder eines Riemens auf ein anderes übertragen werden kann, wie es z. B. bei der Drehbank stattfindet, beruht nur auf der Reibung.

Nur die Reibung zwischen den Hufen des Pferdes und dem Boden bietet jenem den Stützpunkt, dessen es bedarf, um die Last des Wagens nachzuziehen, an welchen es angespannt ist. Dieselbe Function hat die Reibung zwischen den Schienen und dem Umfang der Treibräder einer Locomotive (die Räder, welche durch die Dampfmaschine umgedreht werden). Ohne diese Reibung würde die Kraft der Dampfmaschine nur eine rasche Umdrehung dieser Räder ohne Fortrollen derselben bewirken können. — Wenn die Locomotive einen Wagenzug fortziehen soll, so muß die Summe aller Widerstände, welche durch das Fortziehen aller angehängten Wagen zu überwinden sind, kleiner sein als die gleitende Reibung, welche überwunden werden müßte, wenn die Locomotive auf der Stelle bliebe und nur ihre Räder sich umdrehten. Ist die angehängte Last zu groß, so findet in der That ein rasches Umdrehen der Locomotivräder ohne gleichzeitiges Fortrollen des Zuges Statt, wie man dies öfters bemerken kann, wenn sich große Güterzüge eben in Bewegung setzen.

Aus dieser Betrachtung geht auch hervor, daß die Last, welche eine Locomotive fortzuziehen im Stande ist, nicht allein von der Kraft ihrer Dampfmaschine, sondern auch von ihrem Gewichte abhängt. Nehmen wir an, zwei Locomotiven hätten gleich starke Maschinen, die eine sei aber schwerer als die andere, so wird man mit der schwereren eine größere Last fortziehen können.

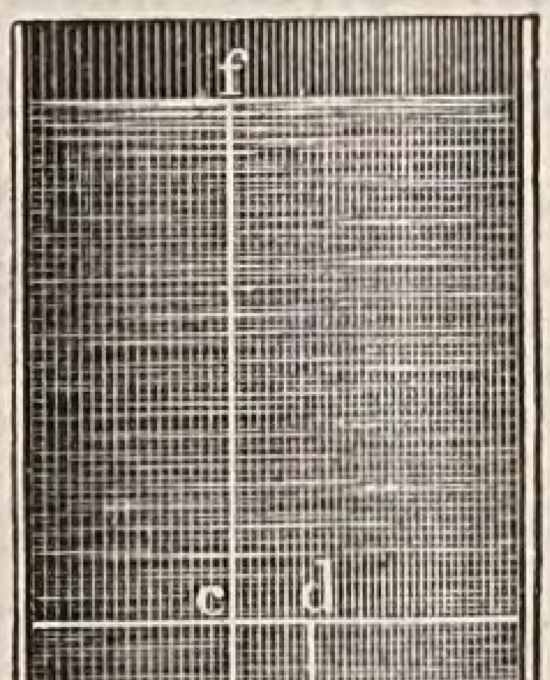
Achtes Capitel.

Hydraulik oder die Bewegungsgesetze der Flüssigkeiten.

Ausflussgeschwindigkeit. Wenn man in die Seitenwand oder 83 in den Boden eines mit einer Flüssigkeit gefüllten, oben offenen Gefäßes eine Oeffnung macht, welche im Vergleich mit den Dimensionen des Gefäßes klein ist, so strömt die Flüssigkeit mit einer Geschwindigkeit aus, welche um so größer ist, je tiefer sich die Oeffnung unter dem Spiegel der Flüssigkeit befindet. Der Zusammenhang zwischen Ausflußgeschwindigkeit und Druckhöhe läßt sich auf folgende Weise ausdrücken: Die Ausflußgeschwindigkeit ist gerade so groß wie die Geschwindigkeit, welche ein freifallender Körper erlangen würde, wenn er von dem Spiegel der Flüssigkeit bis zur Ausflußöffnung herabfiele.

Dieser Satz ist unter dem Namen des Toricelli'schen Theorems bekannt. Er läßt sich auf folgende Weise ableiten.

Fig. 174.



Wenn die Flüssigkeitsschicht $abcd$, Fig. 174, welche sich unmittelbar über der Oeffnung ab befindet, frei herabfiele, ohne durch die über ihr lastende Flüssigkeit beschleunigt zu sein, so würde sie die Oeffnung mit derjenigen Geschwindigkeit verlassen, welche der Höhe ac entspricht, die wir mit h bezeichnen wollen. Diese Geschwindigkeit ist $v = \sqrt{2gh}$ (Seite 133). Nun aber ist die ausströmende Schicht nicht bloß durch ihre eigene Schwere beschleunigt, sondern durch den Druck der ganzen auf ihr lastenden Flüssigkeit. Die Beschleunigung der Schwere g verhält sich demnach zur Beschleunigung g', mit welcher die flüssigen Theilchen ausfließen, wie ac zu af oder wie h zu s, wenn die Druckhöhe mit s bezeichnet wird, d. h.

$$g : g' = h : s,$$

und also ist die Beschleunigung, mit welcher die flüssige Schicht ausfließt, $g' = \frac{g}{h} s$. Wenn aber die Beschleunigung, welche die ausfließende

Schicht erfährt, nicht g, sondern g' ist, so ist auch die Ausflußgeschwindigkeit $v' = \sqrt{2g'h}$; und wenn wir in diesen Werth von v' den eben abgeleiteten Werth von g' setzen, so erhalten wir für die Ausflußgeschwindigkeit:

$$v' = \sqrt{2gs}.$$

Dies ist aber dieselbe Geschwindigkeit, welche ein Körper erlangt, wenn er eine Höhe s frei durchfällt.

Aus diesem Satze folgt unmittelbar:

1) Die Ausflußgeschwindigkeit hängt nur von der Tiefe der Oeffnung unter dem Niveau, aber nicht von der Natur der Flüssigkeit ab. Bei gleichen Druckhöhen muß also Wasser und Quecksilber gleich schnell ausfließen. Jede Quecksilberschicht wird zwar durch einen Druck ausgetrieben, welcher 13,6 mal so groß ist, als beim Wasser, dagegen ist aber auch die Masse eines jeden Quecksilbertheilchens, welches ausfließt, 13,6 mal größer als die eines gleich großen Wassertheilchens.

2) Die Ausflußgeschwindigkeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln der Druckhöhen. Aus einer Oeffnung, welche 100 cm unter dem Wasserspiegel liegt, muß also das Wasser mit 10 mal größerer Geschwindigkeit ausfließen als aus einer anderen, welche nur 1 cm unter dem Niveau liegt.

84 **Versuche über Ausflussgeschwindigkeit.** Um Versuche über Ausflußgeschwindigkeit anzustellen, kann man den unter dem Namen des Mariotte'schen Gefäßes bekannten Apparat Fig. 175 anwenden. Es besteht aus einer hohen Glasflasche mit verticalen Wänden, welche unten mit einem kurzen seitlichen Ansatzrohr versehen ist, auf welches die Messingfassung rs aufgekittet ist. Auf diese Fassung können dann die verschiedenen Ausflußöffnungen aufgeschraubt werden. Auf den oberen Hals des Gefäßes ist gleichfalls eine Messingfassung aufgekittet, in deren Mündung ein wohlschließender Kork paßt. In diesem Kork steckt eine oben und unten offene Glasröhre, deren untere Mündung sich unter dem Spiegel des in der Flasche vorhandenen Wassers befindet. In dem Maaße nun, als unten Wasser ausfließt, dringt die Luft durch die Glasröhre ba ein, indem fortwährend Luftblasen von a in den oberen Theil der Flasche aufsteigen; auf diese Weise wird aber der ganzen Wassermasse von a aufwärts durch den Luftdruck das Gleichgewicht gehalten, so daß nur die Höhe der Flüssigkeitssäule von a bis zur Ausflußöffnung herunter die Ausflußgeschwindigkeit bedingt.

Auf der Flasche ist eine Theilung angebracht, deren Nullpunkt in der Höhe der Ausflußöffnung liegt, während die folgenden Theilstriche 1, 2, 3 u. s. w. Decimeter über demselben angebracht sind. Der Ausfluß wird daher mit einer Geschwindigkeit stattfinden, welche einer Druckhöhe von 1, 2, 3 oder 4 dm entspricht, wenn man die Röhre so stellt, daß ihr unteres Ende sich in der Höhe des Theilstriches 1, 2, 3 oder 4 befindet.

Um einen Wasserstrahl vertical in die Höhe springen zu lassen, wird an die Fassung rs eine Messingplatte mn, Fig 175 a, angeschraubt, welche ein

rechteckiges, gegen die Flasche hin offenes Kästchen *k* trägt. In der oberen dünnen Wand dieses Kästchens befindet sich die Ausflußöffnung *o*. Liegt die obere Wand dieses Kästchens horizontal, so steigt der aus *o* strömende Wasserstrahl vertical in die Höhe. Nach dem, was im vorigen Paragraphen über die Ausflußgeschwindigkeit gesagt wurde, sollte man erwarten, daß der Wasserstrahl die Höhe der drückenden Wassersäule erreichen, daß er also bis zur unteren Mündung *a* der Röhre *ab* aufsteigen würde. Demzufolge sollte der Wasserstrahl bis zum Theilstrich 4 aufsteigen, wenn die Mündung *a* bis zu diesem Theilstrich in die Höhe gezogen ist. Diese Höhe erreicht aber der aufsteigende Wasserstrahl niemals, woran übrigens nur Bewegungshindernisse Schuld sind, indem namentlich die herabfallenden Wassertheilchen hindernd auf die Bewegung der steigenden wirken; deshalb wächst auch die Steighöhe, wenn die Richtung des aufsteigenden Strahls ein wenig von der Verticalen abweicht.

Fig. 175.

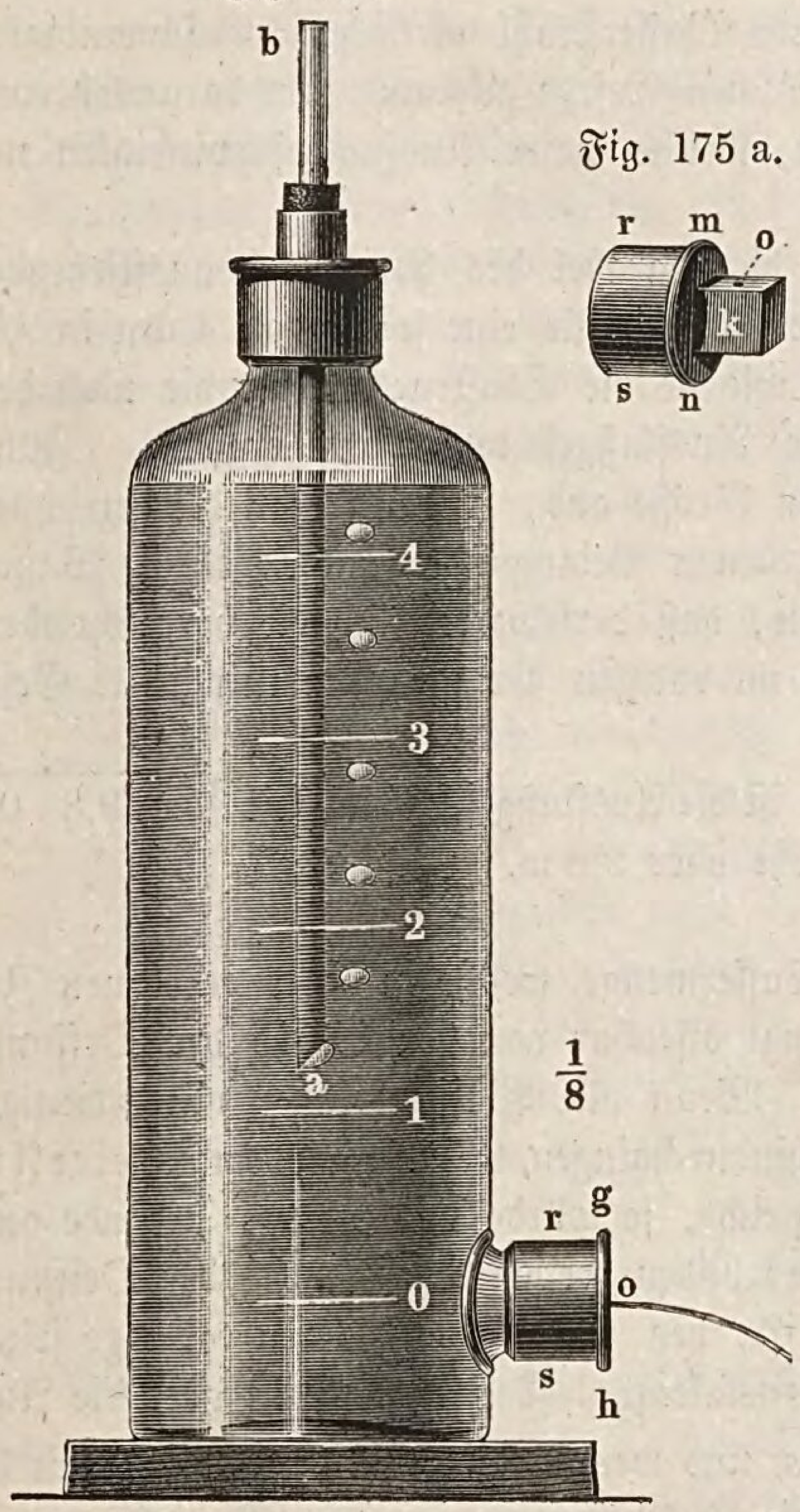
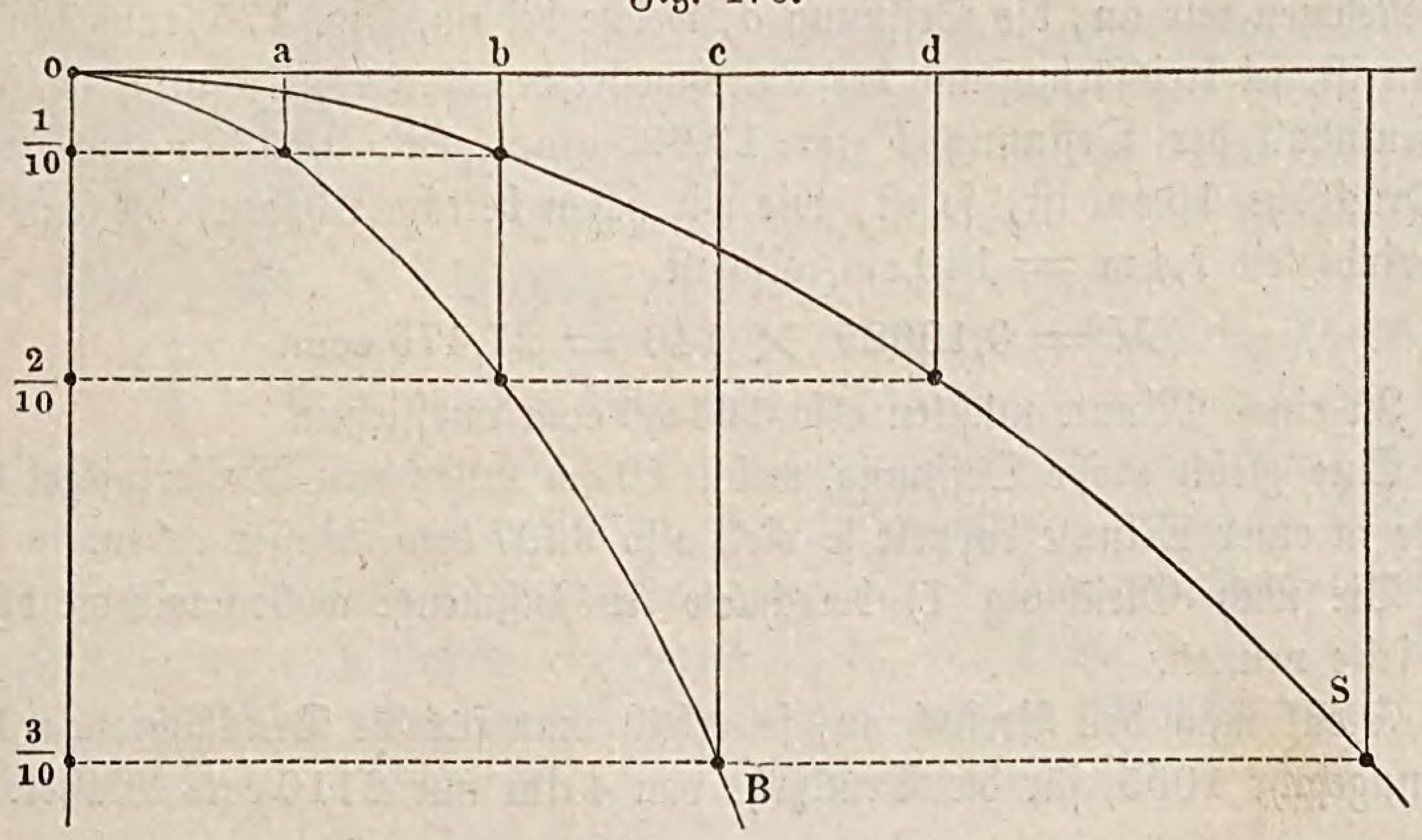


Fig. 175 a.

Um einen horizontal ausfließenden Wasserstrahl zu erhalten,

Fig. 176.



wird an die Fassung *rs* eine dünne Messingplatte *gh*, Fig. 175, angeschraubt, in deren Mitte sich eine kreisförmige Oeffnung von gemessenem Durchmesser befindet.

Daß der horizontal ausströmende Wasserstrahl wirklich die Geschwindigkeit hat, welche ihm nach dem Toricelli'schen Gesetze zukommt, geht daraus hervor, daß er genau die Parabel beschreibt, welche dieser Ausflußgeschwindigkeit entspricht.

In Fig. 176 (a. v. S.) ist die Parabel des horizontal ausfließenden Wasserstrahls für eine Druckhöhe von 1 und für eine solche von 4 dm in $1/_{10}$ der natürlichen Größe dargestellt, wie sie die Construction für die nach dem Toricelli'schen Gesetze berechnete Ausflußgeschwindigkeit ergiebt. Führt man diese Figuren in der zehnfachen Größe aus, so kann man die gezeichnete Curve hinter den unter den angegebenen Bedingungen ausfließenden Wasserstrahl halten und sich so überzeugen, daß derselbe wirklich die vorgeschriebene Bahn beschreibt, wodurch dann das im vorigen Paragraphen entwickelte Gesetz bestätigt ist.

Für eine Druckhöhe von 0,1 m ist die Ausflußgeschwindigkeit $\sqrt{2 . 9{,}8 . 0{,}1} = 1{,}4$ m, für die vierfache Druckhöhe aber 2,8 m.

85 **Ausflussmenge.** Die Wassermenge, welche in einer gegebenen Zeit aus einer Oeffnung ausfließt, hängt offenbar von der Größe der Oeffnung und der Ausflußgeschwindigkeit ab. Wenn alle Wassertheilchen mit derjenigen Geschwindigkeit durch die Oeffnung hindurchgingen, welche nach dem Toricelli'schen Theorem der Druckhöhe entspricht, so würde die in einer Secunde ausfließende Wassermenge einen Cylinder bilden, dessen Basis gleich der Oeffnung und dessen Höhe gleich dem Wege ist, den ein Wassertheilchen vermöge seiner Geschwindigkeit in einer Secunde zurücklegt. Dieser Weg ist aber die Ausflußgeschwindigkeit selbst, also $\sqrt{2gs}$, und wenn wir nun den Flächeninhalt der Oeffnung mit F bezeichnen, so ist die Ausflußmenge in einer Secunde

$$M = F\sqrt{2gs} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Nehmen wir an, die Oeffnung *o*, welche bei *rs*, Fig. 175, angeschraubt worden ist, sei kreisförmig und der Durchmesser des Kreises sei 5 mm, so ist der Flächeninhalt der Oeffnung $F = 19{,}625$ qmm oder 0,19625 qcm; wenn die Druckhöhe 10 cm ist, so ist, wie wir schon berechnet haben, die Ausflußgeschwindigkeit 1,4 m = 140 cm, also ist

$$M = 0{,}19625 \times 140 = 27{,}475 \text{ ccm}.$$

In einer Minute müßten also 1648,5 ccm ausfließen.

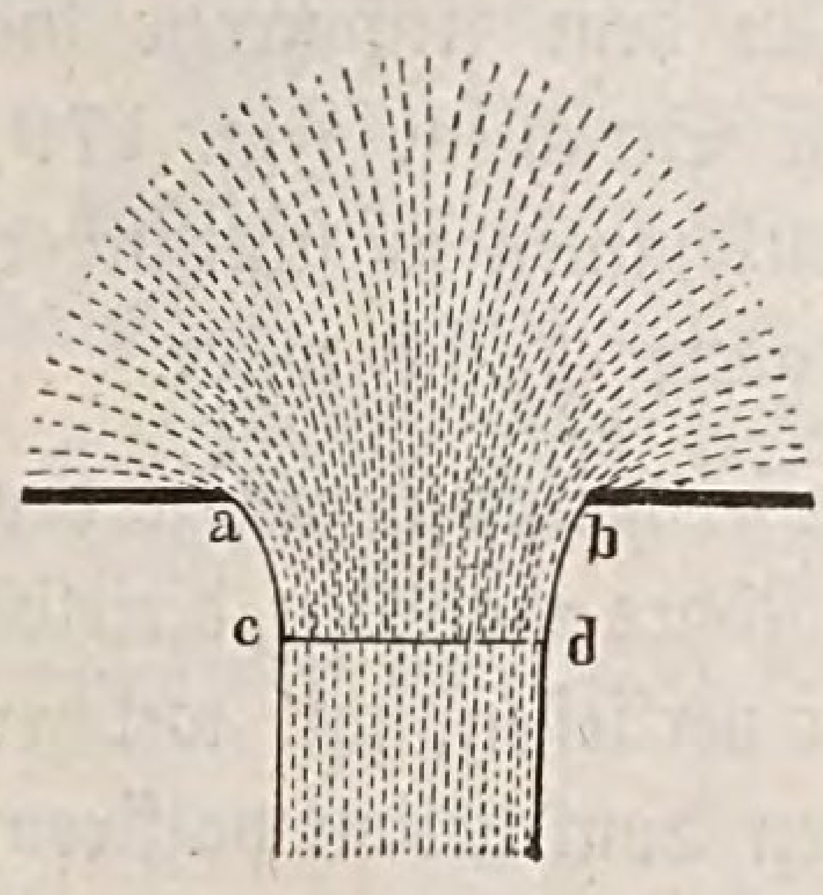
Eine gleich große Oeffnung, welche 40 cm unter dem Wasserspiegel liegt, müßte in einer Minute doppelt so viel, also 3297 ccm Wasser geben.

Die nach Gleichung 1) berechnete Ausflußmenge wollen wir die theoretische nennen.

Stellt man den Versuch an, so erhält man für die Druckhöhe von 1 dm nur ungefähr 1055, für die Druckhöhe von 4 dm nur 2110 ccm Wasser.

Diese Verschiedenheit zwischen der sogenannten theoretischen und der beobachteten Ausflußmenge beweist, daß nicht alle Wassertheilchen die Oeffnung mit der Geschwindigkeit verlassen, welche der Druckhöhe entspricht. In der That haben im Querschnitte der Oeffnung nur die in der Mitte sich befindenden Wasserfäden diese Geschwindigkeit, während sie für die mehr nach dem Rande der Oeffnung hin ausfließenden geringer ist. Da nämlich die einzelnen Schichten der Wassersäule, welche rechtwinklig auf der Oeffnung steht, nicht gleichzeitig die gleiche Geschwindigkeit haben, sondern sich um so langsamer bewegen, je weiter sie von der Oeffnung entfernt sind, so würde ein Zerreißen der auf einander folgenden Schichten stattfinden, wenn nicht auch von der Seite her Wassertheilchen der Oeffnung zuströmten, welche sich nicht parallel mit der Axe des ausfließenden Strahles, sondern convergirend gegen dieselbe bewegen, wie dies in Fig. 177 angedeutet ist. Damit hängt es denn auch zusammen, daß der ausfließende Wasserstrahl nicht vollkommen cylindrisch ist, sondern daß er sich vor der Oeffnung zusammenzieht (contractio venae). Bei cd beträgt der Querschnitt des Wasserstrahls ungefähr noch $^2/_3$ vom Flächeninhalte der Oeffnung. Ebenso beträgt die wirkliche Ausflußmenge ungefähr $^2/_3$ der theoretischen.

Fig. 177.



Bezeichnen wir mit Q die wirkliche Ausflußmenge, so ist demnach

$$Q = {}^2/_3\, M = {}^2/_3\, F\sqrt{2gs}$$

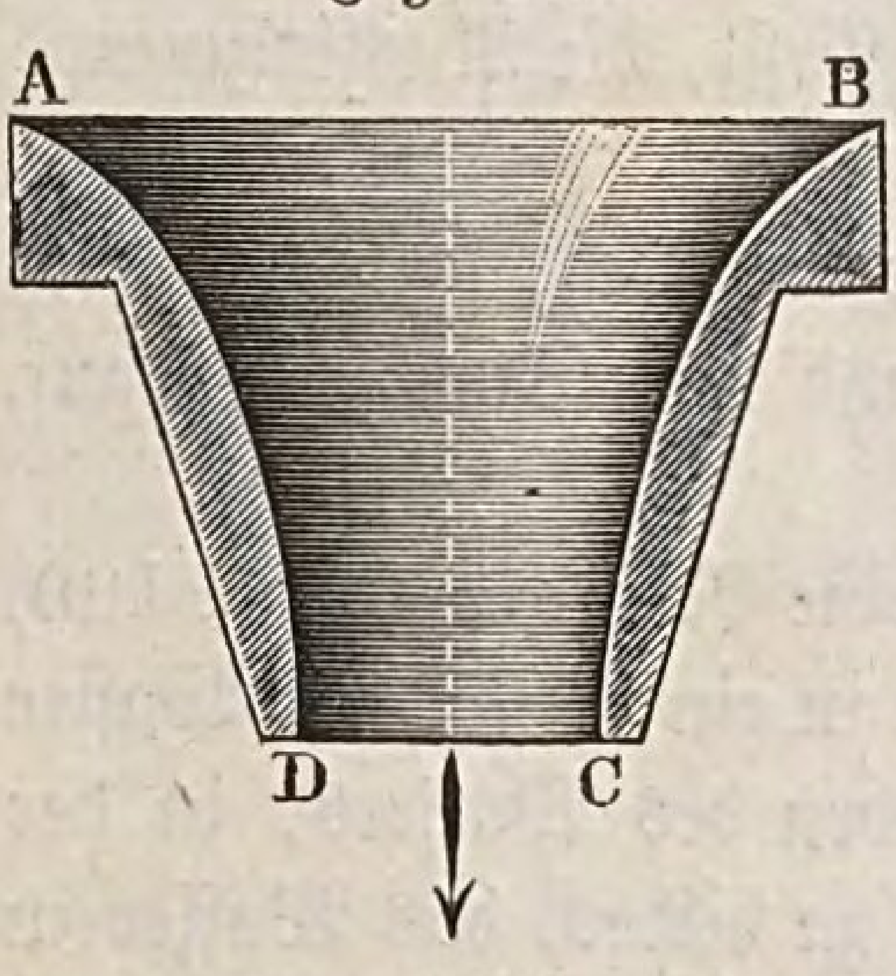
oder genauer

$$Q = 0{,}64\, F\sqrt{2gs}.$$

Einfluss der Ansatzröhren auf die Ausflussmenge. 86

Wenn der Ausfluß nicht durch Oeffnungen geschieht, welche in eine dünne Wand gemacht sind, sondern durch kurze Röhren, so finden merkwürdige Modificationen Statt, die wir jetzt näher betrachten wollen.

Fig. 178.



Wenn eine kurze Ansatzröhre, Fig. 178, genau die Gestalt des freien Strahls von der Oeffnung bis zu der Stelle hat, von welcher an die Contraction nicht mehr wirklich zunimmt, so übt sie gar keinen Einfluß auf die Ausflußmenge aus.

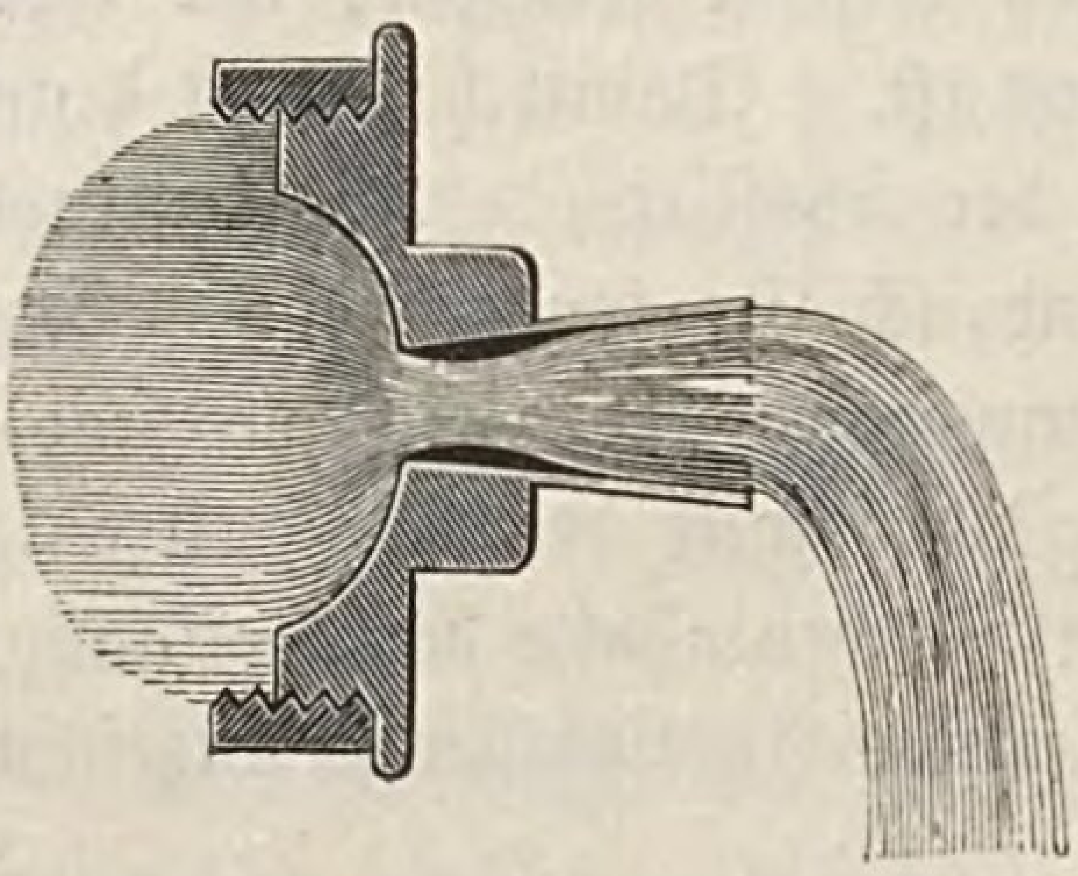
Durch kurze cylindrische Ansatzröhren fließt der Strahl entweder frei durch, wie durch eine Oeffnung von gleichem Durchmesser, und in diesem Fall übt die Röhre keinen Einfluß aus; oder das Wasser hängt sich an die Wände der Röhre, so daß die Flüssigkeit die ganze Röhre ausfüllt und ein Strahl vom Durchmesser der Röhre ausfließt.

Ein kurzes conisches Ansatzrohr wirkt, im Falle es voll ausfließt, wie ein cylindrisches, nur bewirkt es eine noch größere Vermehrung der Ausflußmenge.

Die Ausflußgeschwindigkeit wird durch cylindrische oder conische Ansatzröhren in demselben Verhältniß vermindert, in welchem die Ausflußmenge vermehrt wird.

Der Einfluß der Ausflußröhre erklärt sich auf folgende Weise: Indem das Wasser in das Ansatzrohr einströmt, erleidet es eine Contraction, wie wenn es aus einer Oeffnung in dünner Wand ausflösse; weiterhin aber, sobald einmal die Röhrenwände benetzt sind, bewirkt die Adhäsion an die Röhrenwände, daß sich die Ansatzröhre vollständig anfüllt, und somit ist der Querschnitt des Strahles durch das Ansatzrohr vergrößert, namentlich ist er beim Austritt aus dem Rohre größer als an der Stelle der Contraction, wie man dies in Fig. 179 sieht. Daß eine solche Contraction in der Röhre wirklich stattfinden muß, geht daraus hervor, daß, wenn man dem Ansatzrohr die Gestalt des contrahirten Strahles, Fig. 179, giebt, der Ausfluß vollkommen so stattfindet, als ob das Ansatzrohr ganz conisch wäre.

Fig. 179.

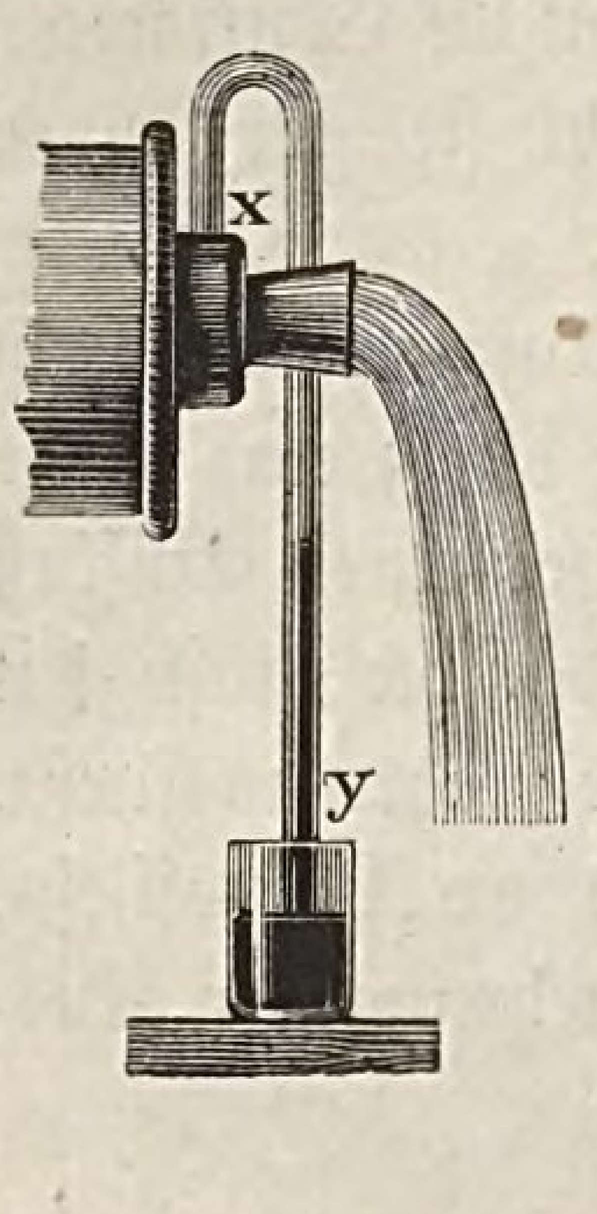


Wenn nun die Wassertheilchen, welche den ganzen Querschnitt der Röhre ausfüllen, dieselbe mit der Geschwindigkeit verließen, mit welcher sie die Stelle der größten Contraction passiren, so müßte nothwendig ein Zerreißen der auf einander folgenden Wasserschichten eintreten. Die Trennung der Wassertheilchen, also die Bildung von leeren Räumen, wird aber durch den Druck der Luft verhindert, welcher einerseits den Eintritt der Wassertheilchen in das Rohr beschleunigt, dagegen aber auch andererseits den Ausfluß aus demselben verzögert. Durch den Druck der Luft werden die ausfließenden Wassertheilchen so viel zurückgehalten, daß dadurch ein voller Ausfluß möglich wird.

Daß der Luftdruck hier wirklich diese Rolle spielt, geht daraus hervor, daß, wenn das Wasser in einen luftleeren Raum ausfließt, die Ausflußmenge durch Ansatzröhren nicht vermehrt wird.

Macht man in die Seitenwand der Ansatzröhre ein Loch, so wird durch diese Oeffnung Luft eingesaugt, und der Strahl hört auf, continuirlich zu sein.

Fig. 180.



Wenn in diese Seitenöffnung eine Röhre xy, Fig. 180, eingesetzt wird, deren unteres Ende in ein Gefäß mit Wasser mündet, so wird durch das Bestreben des Wassers, in der Ansatzröhre einen luftleeren Raum zu bilden, das Wasser in der Röhre xy in die Höhe gesaugt. Dieses Phänomen des Saugens beweist ebenfalls den Einfluß des Luftdrucks auf die soeben betrachteten Erscheinungen. Da eine conische Ansatzröhre eine noch größere Ausflußmenge giebt als eine cylindrische, so muß sie auch ein stärkeres Saugen erzeugen, d. h. es wird in der Röhre xy unter übrigens gleichen Um-

ständen durch ein conisches Ansatzrohr die aufgesaugte Wassersäule zu einer größeren Höhe gehoben als durch ein cylindrisches.

Seitendruck bewegter Flüssigkeiten. Wenn aus irgend 87
einem Behälter das Wasser durch eine längere Röhre abfließt, so wird in derselben ein Reibungswiderstand auftreten, dessen Ueberwindung einen Theil des vorhandenen hydrostatischen Druckes in Anspruch nimmt, welcher also der Bewegung nicht zu Gute kommt.

Man schraube an die Messingfassung *rs*, Fig. 175, eine Platte *gh* an, in deren Mitte eine 1 bis 2 m lange, 1,5 bis 2 mm weite Glasröhre eingesetzt ist, so wird das Wasser am Ende der Röhre weit langsamer ausfließen, als man nach der vorhandenen Druckhöhe erwarten sollte.

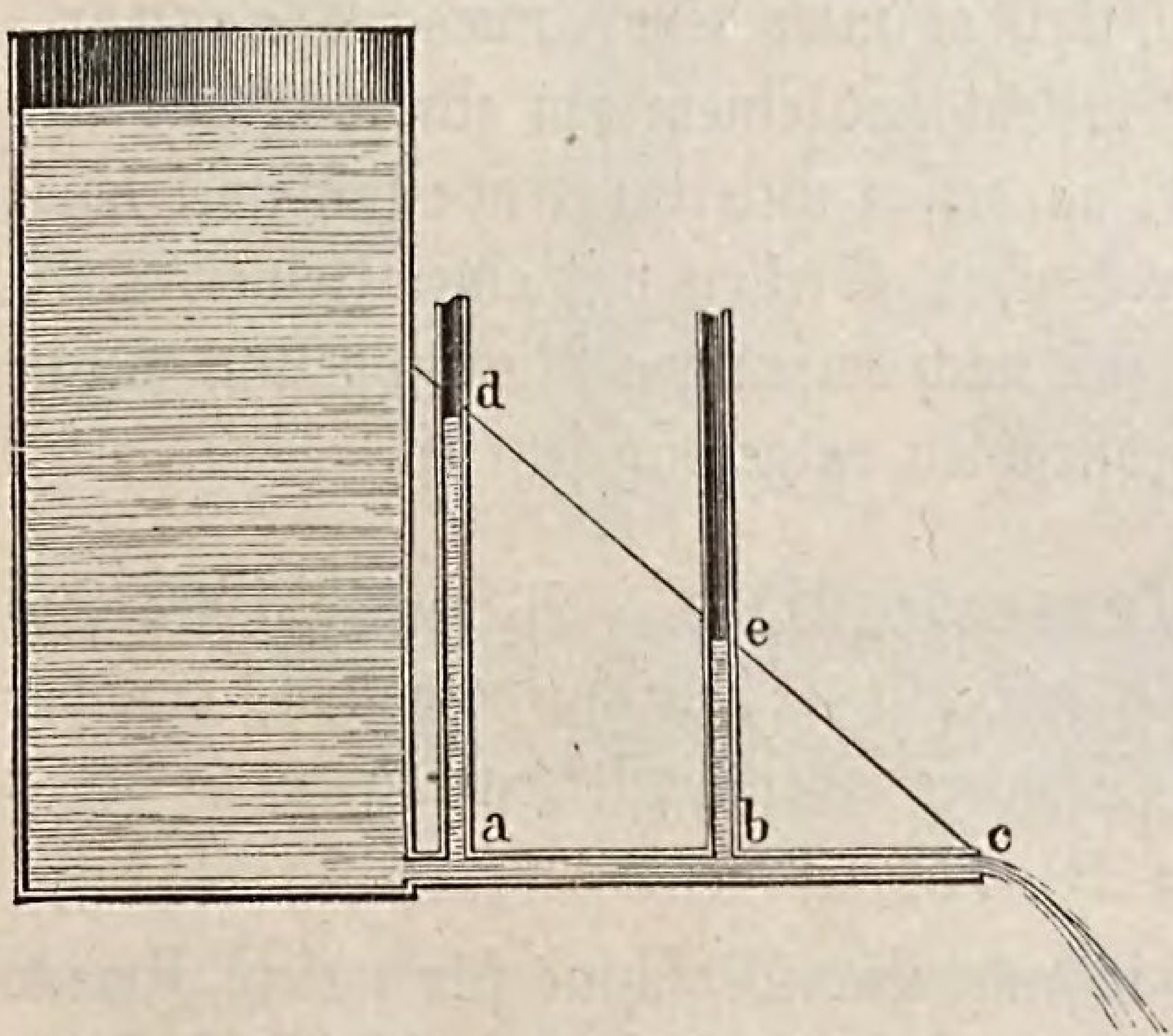
Wendet man mehrere gleich lange Röhren von verschiedenem Durchmesser zu diesem Versuche an, so sieht man, wie die Ausflußgeschwindigkeit abnimmt, wenn die Röhren enger werden.

Gesetzt, man habe gefunden, daß die Ausflußgeschwindigkeit v für eine dieser Röhren nur halb so groß sei, als man nach der Größe der Druckhöhe s hätte erwarten sollen, daß also

$$v = \frac{1}{2}\sqrt{2gs} = \sqrt{2g\frac{s}{4}},$$

so ist die Ausflußgeschwindigkeit eine solche, wie sie der Druckhöhe $\frac{s}{4}$ entspricht; $^3/_4$ der Druckhöhe s sind also zur Ueberwindung der Reibungswiderstände in der Röhre nöthig.

Fig. 181.



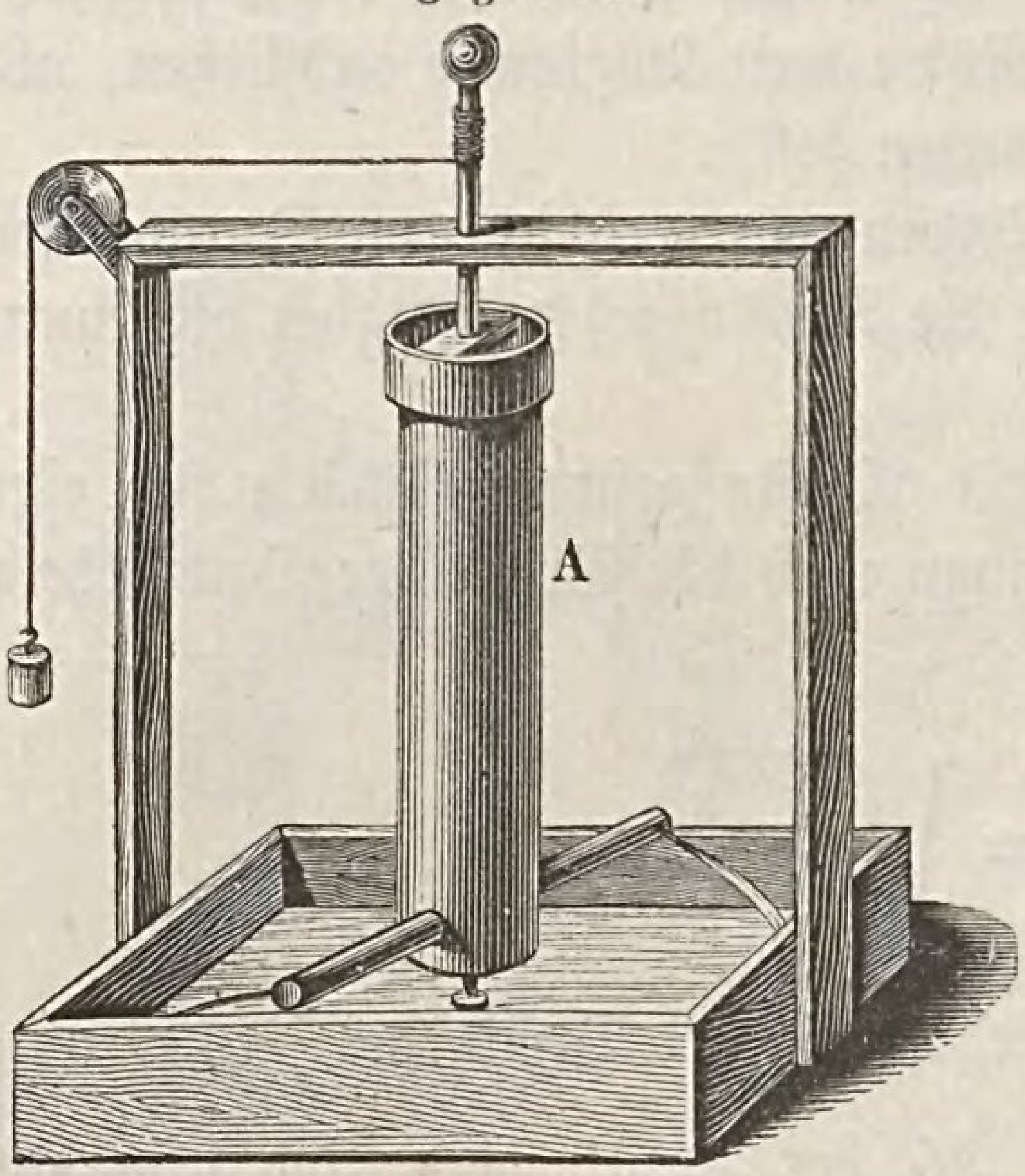
Wenn in der Röhre *ac*, Fig. 181, das Wasser sich mit der Geschwindigkeit bewegte, welche der Druckhöhe im Behälter entspricht, so hätten die Röhrenwände gar keinen Druck auszuhalten; da aber das Wasser die Röhre *ac* mit einer Geschwindigkeit durchströmt, welche nur einem Theile der Druckhöhe entspricht, so muß der Rest als hydrostatischer Druck auf die Röhrenwände wirken. Der Druck, den die Wände auszuhalten haben, ist jedoch nicht an allen Stellen der Röhre gleich, er ist um so geringer, je näher sie der Ausflußöffnung *c* liegen, wie sich zeigen läßt, wenn an verschiedenen Stellen der Ausflußröhre *ac* verticale Glasröhrchen eingesetzt sind.

In manchen Fällen kann der Druck, den die Röhrenwände von innen auszuhalten haben, kleiner sein, als der von außen auf sie wirkende Luftdruck; es ist dies überall da der Fall, wo die Bedingungen erfüllt sind, unter welchen das

Phänomen des **Saugens** stattfinden kann. Näheres über den Reibungswiderstand in langen Röhren im Supplementbande.

88 **Reaction, welche durch das Ausströmen der Flüssigkeiten erzeugt wird.** Ein mit Wasser gefülltes Gefäß bleibt vollständig in Ruhe, weil jeder Seitendruck durch einen vollkommen gleichen, aber entgegengesetzten aufgehoben wird. Wenn man aber die Wand an irgend einer Stelle durchbohrt, so daß das Wasser hervorspringt, so ist der Druck an dieser Stelle offenbar weggenommen, während das der Oeffnung diametral gegenüberliegende Wandstück noch gerade so stark gedrückt wird als vorher. Der Druck auf diejenige Gefäßwand, in welcher sich die Oeffnung befindet, ist also geringer als der Druck, welchen die gegenüberstehende Wand aushält; mithin wird das ganze Gefäß sich in einer Richtung bewegen müssen, welche der Richtung des ausfließenden Wasserstrahls entgegengesetzt ist, vorausgesetzt, daß diese Bewegung nicht durch Reibung oder auf irgend eine andere Weise verhindert wird. Es ist dies dem Rückstoß der Geschütze zu vergleichen. Man kann die beim Ausfließen des Wassers wirkende Reaction durch einen Apparat anschaulich machen, welcher unter dem Namen des **Segner'schen Wasserrades** bekannt ist. Es besteht aus einem um eine verticale Axe leicht drehbaren Gefäße A, Fig. 182, an dessen unterem Ende sich zwei horizontale Röhren befinden, die an entsprechenden Stellen mit einer kleinen Oeffnung versehen sind. Das Gefäß dreht sich nach derjenigen Richtung um, welche der Richtung der ausströmenden Wasserstrahlen entgegengesetzt ist.

Fig. 182.



89 **Lebendige Kraft der Wassergefälle.** Wenn in jeder Secunde eine Wassermasse, deren Gewicht wir mit P bezeichnen wollen, von der Höhe H herabfällt, so leistet dabei die Schwere einen positiven Effect

$$E = P \,.\, H,$$

welchen wir durch Uebertragung auf irgend eine Maschine für unsere Zwecke verwenden können. Diese Uebertragung kann aber auf zweierlei Weise stattfinden, nämlich:

1) durch **Stoß**, indem man das Wasser ungehindert in seinem Gerinne herabströmen und es dann mit der erlangten Geschwindigkeit gegen irgend einen Körper, etwa gegen die Schaufeln eines unterschlägigen Wasserrades, stoßen läßt, oder

2) durch **Druck**, indem man das Wasser schon während seines Niederganges mit seinem Gewicht auf dem zu bewegenden Körper lasten läßt, so daß

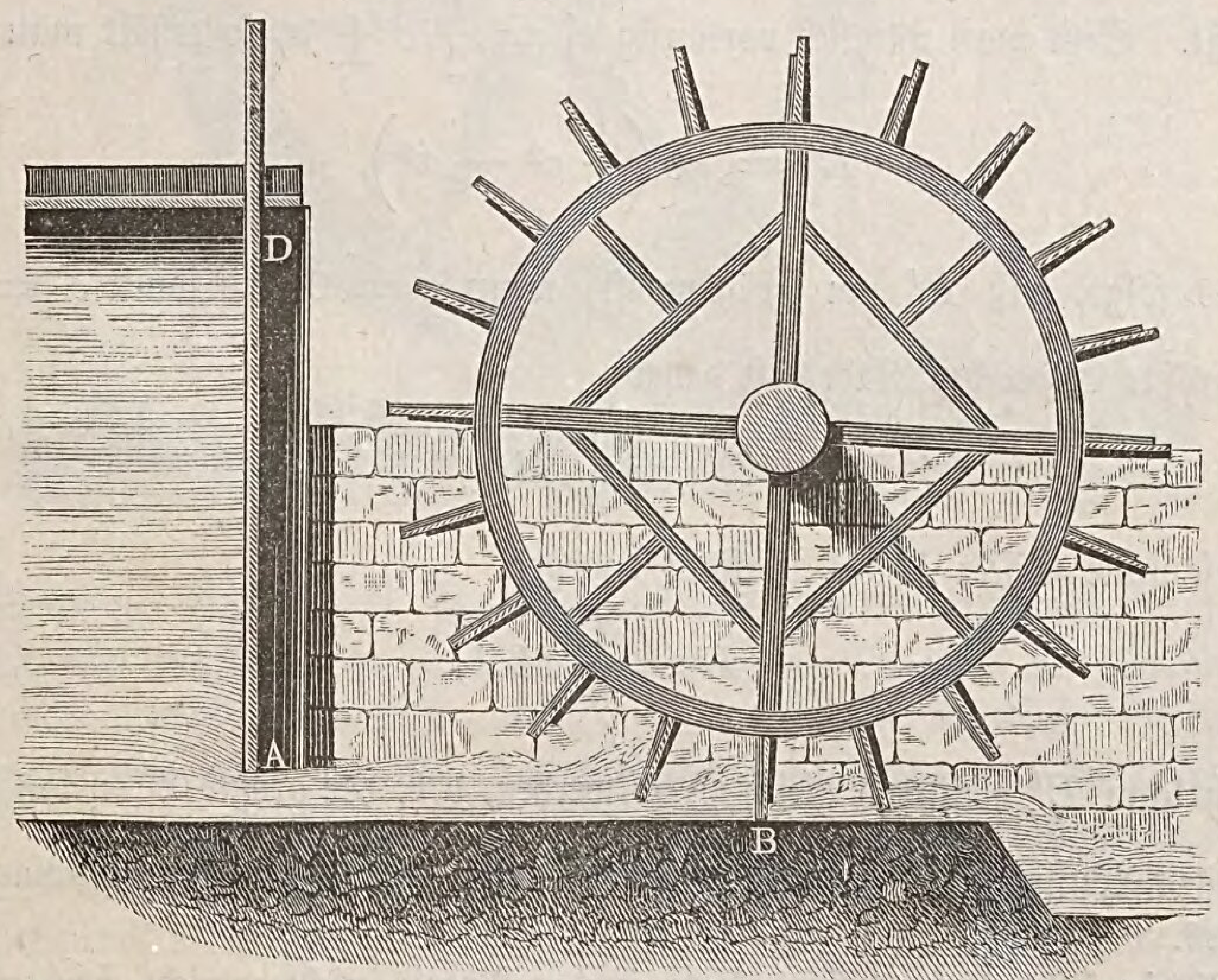
es nur mit geringer Geschwindigkeit herabsinkt, wie dies z. B. bei oberschlägigen Wasserrädern und bei den Hydromotoren der Fall ist.

Mag nun aber die Benutzung der Arbeitsfähigkeit eines Wassergefälles auf die eine oder die andere Art stattfinden, so ist es doch ganz unmöglich, den theoretischen Effect, als welchen wir die Arbeit PH bezeichnen wollen, vollständig zu verwerthen, und zwar schon aus dem einfachen Grunde, weil man dem herabsinkenden Wasser seine lebendige Kraft nicht vollständig entziehen darf, damit ihm eine zum Abfluß nöthige Geschwindigkeit bleibt.

Verticale Wasserräder. Die gewöhnlichen Wasserräder drehen 90
sich in verticaler Ebene um eine horizontale Axe. Man unterscheidet drei Hauptarten der verticalen Wasserräder, unterschlägige, oberschlägige und mittelschlägige.

Bei den unterschlägigen Rädern, Fig. 183, stehen die Schaufeln rechtwinklig auf dem Umfange des Rades. Die untersten Schaufeln sind

Fig. 183.



in das Wasser eingetaucht, welches mit einer Geschwindigkeit fortfließt, die von der Höhe des Gefälles abhängt.

Das fließende Wasser setzt nun auch das Rad in Bewegung und theilt ihm eine Geschwindigkeit mit, welche nach Umständen bald größer bald kleiner sein wird.

Wenn der Stoß des Wassers dem Rade eine Geschwindigkeit mittheilen soll, welche derjenigen gleich ist, mit welcher das Wasser fließen würde, wenn das Rad gar nicht da wäre, so darf das Rad dieser Bewegung gar keinen Widerstand entgegensetzen, und kann daher auch keinen Widerstand überwinden;

mithin kann es in diesem Falle keine mechanische Arbeit leisten, sein Effect ist also gleich Null.

Andererseits könnte man den Widerstand, den das Rad zu überwinden hat, so groß machen, daß der Stoß des Wassers es gar nicht in Bewegung setzt, daß das Wasser des Gefälles nur einen statischen Druck ausübt, welcher jenem das Gleichgewicht hält. In diesem Falle ist der Effect abermals Null.

Bezeichnet man die secundlich zum Stoß gelangende Wassermasse mit M, ihre Geschwindigkeit mit c, die der Radschaufeln mit c', so giebt die Theorie für den Druck P, welchen das Wasser gegen die Schaufeln ausübt, den Werth

$$P = M\,(c - c').$$

Der Effect E', mit welchem das Rad umgedreht wird, ist daher

$$E' = Pc' = M\,(c - c')\,c';$$

dieser Werth wird am größten, wenn die Schaufeln die halbe Geschwindigkeit des aufschlagenden Wassers haben, also wenn $c' = \frac{1}{2}\,c$, wie sich leicht beweisen läßt. Setzt man nämlich vorläufig $c' = \frac{1}{2}\,c \pm x$, so erhält man

$$E' = M\left(\frac{1}{4}\,c^2 - x^2\right),$$

woraus folgt, daß E' am größten ist, wenn $x = 0$ und somit $c' = \frac{1}{2}\,c$. Der größte Effect des Rades ist daher

$$E' = \frac{1}{4}\,Mc^2,$$

der gesammte Effect E des Wassers dagegen

$$E = \frac{1}{2}\,Mc^2;$$

folglich kann E' höchstens gleich $\frac{1}{2}\,E$ werden, d. h. der größte Effect des unterschlägigen Wasserrades ist höchstens gleich dem halben Effecte des aufschlagenden Wassers.

Allein selbst dieser Effect kann in der Praxis nicht erreicht werden, weil immer ein Theil der Kraft durch Adhäsion des Wassers an den Wänden des Gerinnes, durch Reibungswiderstände u. s. w. verloren geht. Sorgfältig angestellte Versuche ergaben für den Effect E' unterschlägiger Räder, welche sich in einem Gerinne bewegen, in welchem ein seitliches Abfließen des Wassers nicht stattfinden kann, den Werth

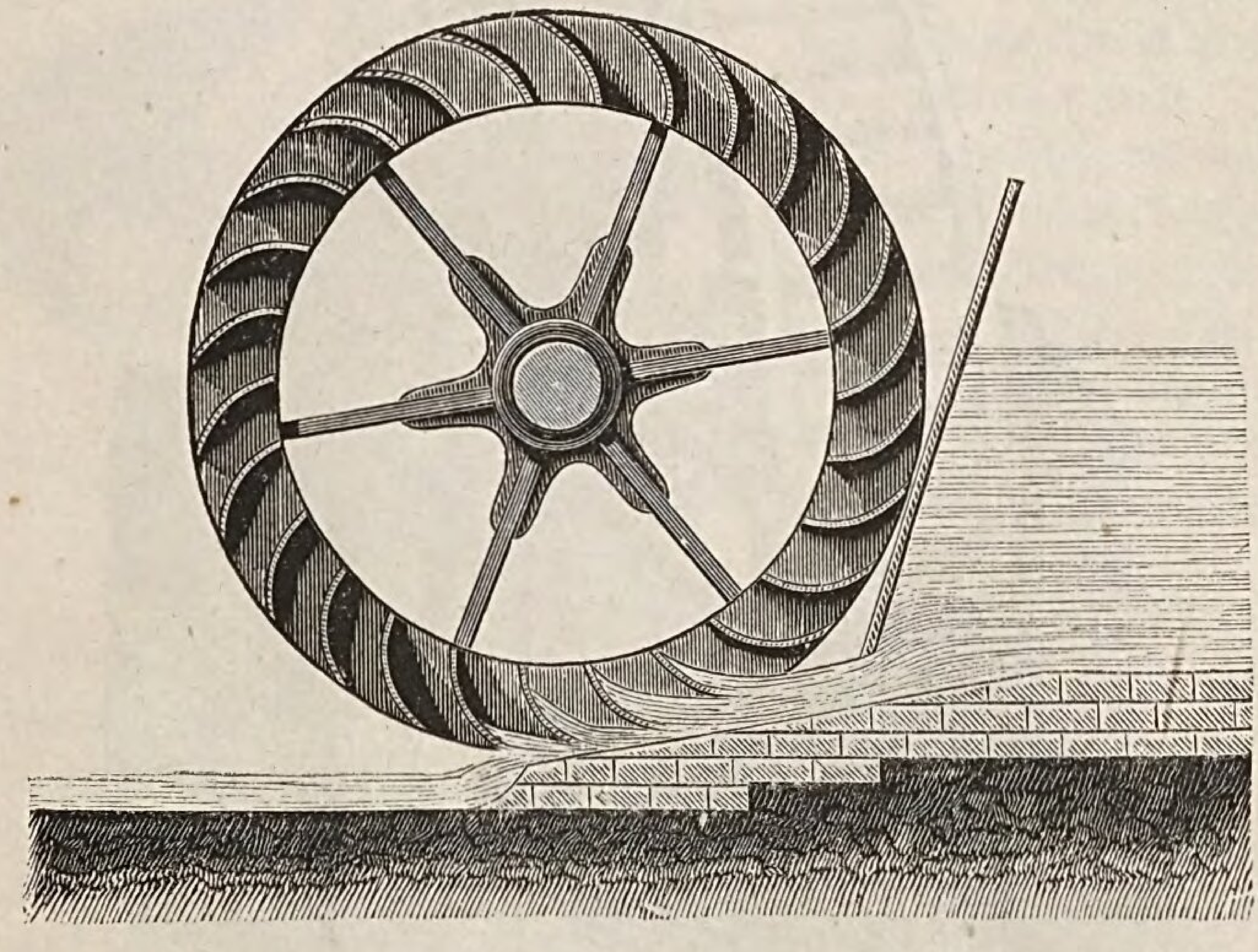
$$E' = 0{,}3\ E.$$

Bei frei hängenden Rädern aber, wie man sie an Schiffsmühlen anbringt, wo das Wasser seitlich abfließen kann, ist der Effect noch weit mehr vom absoluten Maximum entfernt.

Die unterschlägigen Räder werden da angewandt, wo man über ein Gefälle von ziemlich bedeutender Wassermenge, aber geringer Fallhöhe zu verfügen hat.

Weil durch die eben betrachteten unterschlägigen Räder bei dem rechtwinkligen Stoße des Wassers gegen die Schaufeln die Arbeitsfähigkeit des Gefälles so sehr schlecht benutzt wird, hat Poncelet (1826) ein unterschlägiges Rad mit krummen Schaufeln, Fig. 184, construirt, dessen Effect dem absoluten Maximum weit näher kommt.

Fig. 184.



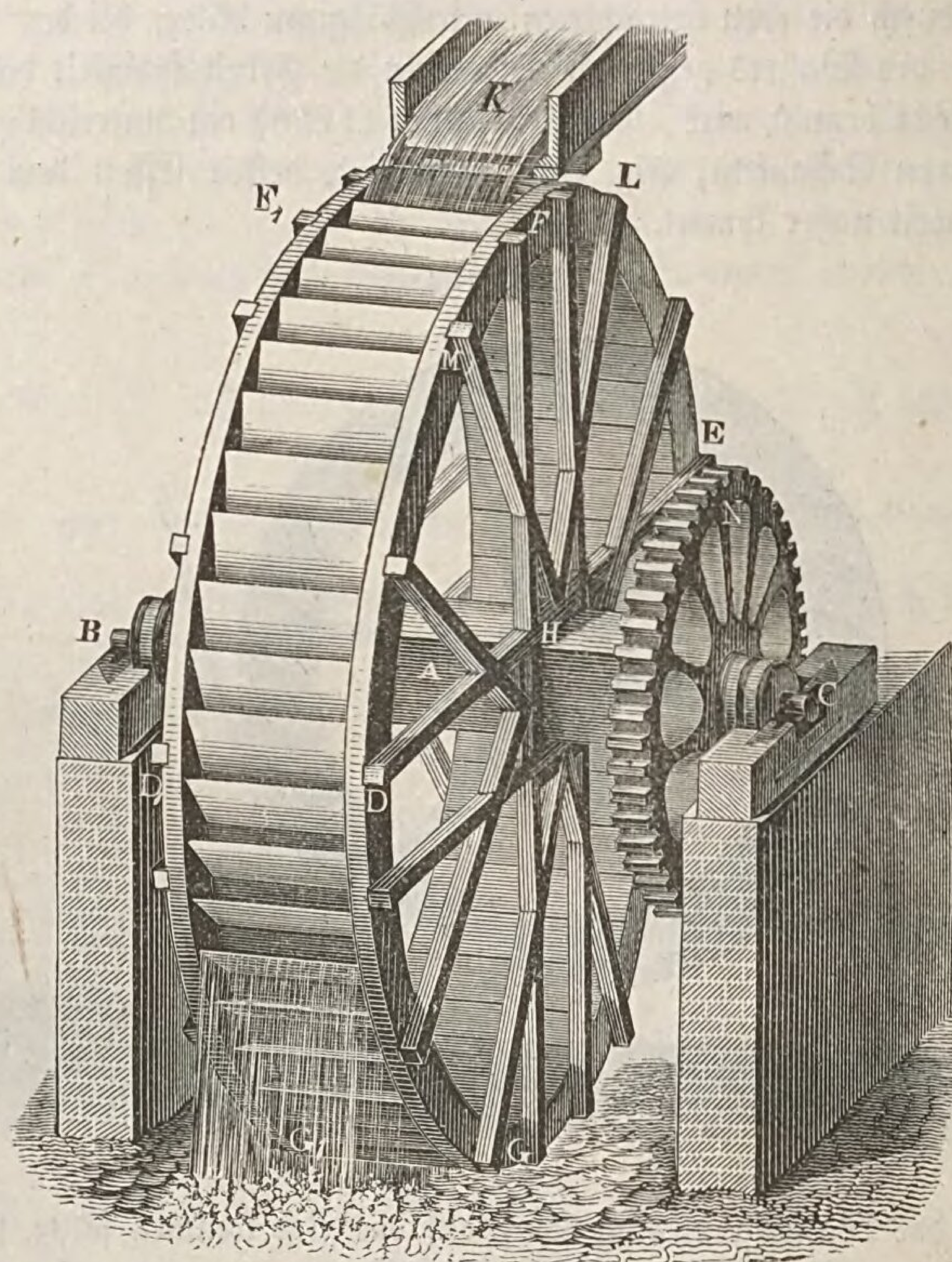
Wenn das Wasser ganz ohne Stoß auf das Rad kommen sollte, so müßten die Schaufeln am Radumfange mit der Richtung der Tangente zusammenfallen; wollte man aber die Schaufeln wirklich so construiren, daß dieser Bedingung Genüge geleistet wird, so wäre der Austritt des Wassers aus dem Rade gehemmt; auch darf das Wasser seine Geschwindigkeit doch nicht vollständig an das Rad abtreten, weil ihm sonst keine Geschwindigkeit zum Abflusse mehr bliebe. Somit ist auch bei dem Poncelet'schen Rade ein gewisser Verlust, die Widerstände ungerechnet, unvermeidlich.

Solche Räder mit krummen Schaufeln sollen einen Effect geben, welcher $^2/_3$ bis $^3/_4$ des absoluten Maximums beträgt. Der große Effect der Poncelet'schen Räder erklärt sich daraus, daß das Wasser, indem es auf der krummen Schaufel hinaufsteigt, seine Geschwindigkeit verliert und größtentheils an das Rad abgiebt.

Die oberschlägigen Räder, Fig. 185 (a. f. S.), werden bei höheren Gefällen von geringerer Wassermasse, bei kleineren Gebirgsbächen angewandt. Das Wasser füllt, von oben auf das Rad laufend, die Zellen auf der einen Seite des Rades, welches eben durch dieses Uebergewicht umgedreht wird.

Daß der Effect eines oberschlägigen Rades gleichfalls den theoretischen Effect *PH* nie erreichen kann, geht daraus hervor, daß das Wasser in den

Fig. 185.



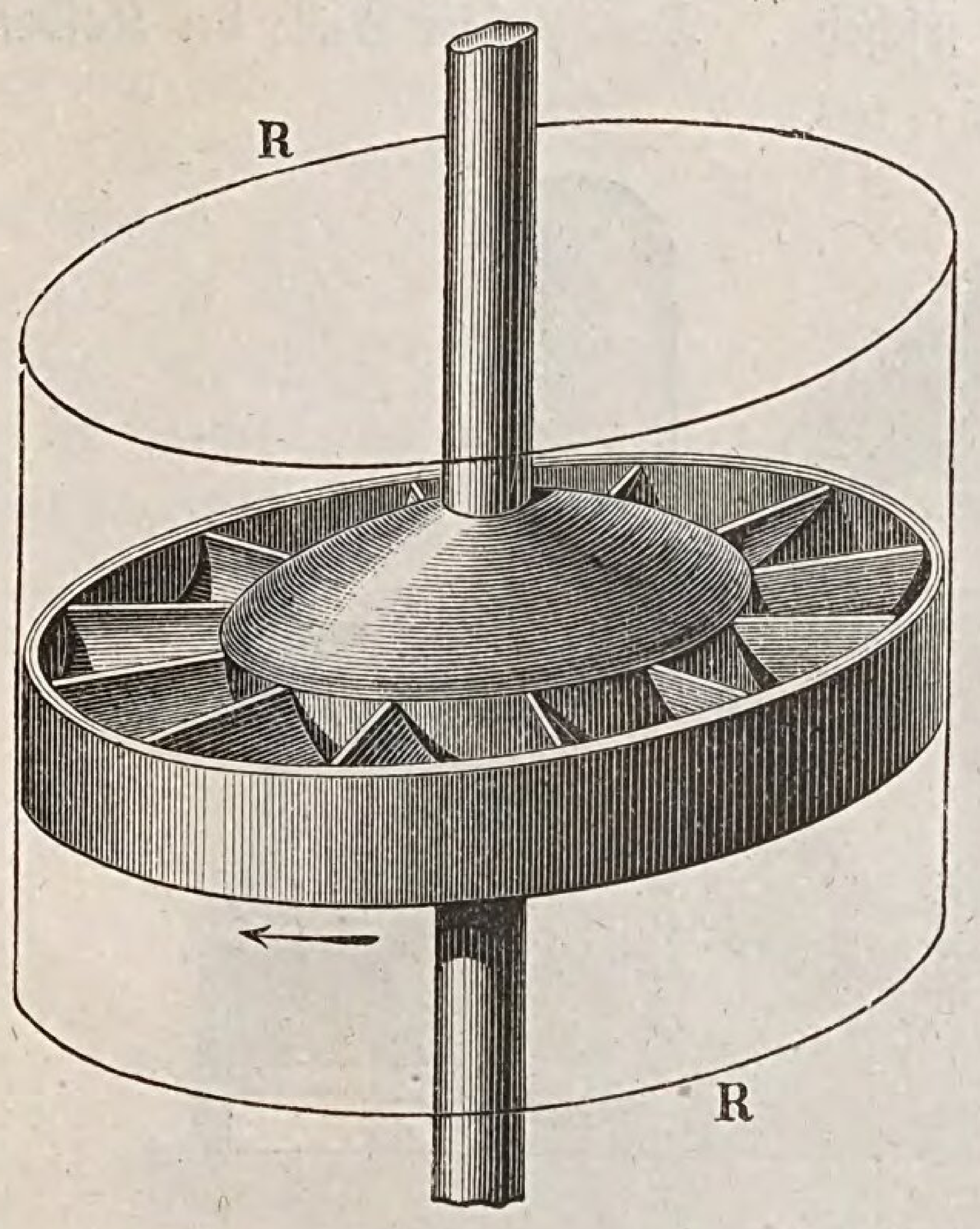
Zellen des Rades mit einer namhaften Geschwindigkeit niedergeht, welche nicht für die Arbeit verwerthet wird, und daß die Zellen das Wasser nicht bis zum tiefsten Punkte des Rades behalten können, sondern schon früher auszugießen beginnen. Ein gut gebautes oberschlägiges Rad soll einen Effect hervorbringen, welcher 75 Procent des theoretischen Effects beträgt, vorausgesetzt, daß es sich langsam umdreht; denn bei rascher Umdrehung bleibt das Wasser in den Zellen in Folge der Centrifugalkraft nicht horizontal, sondern es steigt nach außen, so daß es noch früher aus den Zellen herausfällt.

Das mittelschlägige Rad bildet den Uebergang vom unterschlägigen zum oberschlägigen.

91 **Die horizontalen Wasserräder**, die man auch Turbinen nennt, sind nie so freiliegend wie die verticalen, sondern sie stecken meist so in der Masse des bewegenden Wassers, daß sie während des Ganges ganz unsichtbar sind.

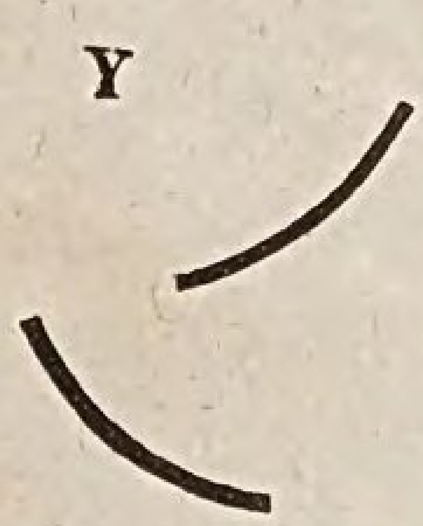
Fig. 186 erläutert eine der einfachsten Formen der Turbine. In einem verticalen cylindrischen Rohre *RR*, durch welches das Wasser aus einem höher gelegenen Behälter in den Abzugscanal herabströmt, und von welcher in unserer Figur nur ein Stück durch einfache Linien angedeutet ist, befindet sich ein Rad, dessen Durchmesser nur so viel kleiner ist als der Durchmesser des Rohres, daß es sich frei um seine verticale Axe in horizontaler Ebene umdrehen kann. Während der mittlere Theil des Rades verschlossen ist, befinden sich im Kranze desselben Schaufeln, deren Stellung leicht aus der Figur zu ersehen ist. Indem nun das Wasser über diese Schaufeln herabströmt, übt es auf dieselben einen Druck aus, welcher das Rad in der Richtung des kleinen Pfeils rotiren macht, und zwar mit einer Kraft, welche von der Masse des durchströmenden Wassers und der Druckhöhe desselben abhängt.

Fig. 186.



Die durch die Figur erläuterte Anordnung der Schaufeln im Radkranz ist im Wesentlichen die der Hendschel-Jonval'schen Turbine, bei welcher aber, um einen besseren Effect zu erzielen, über dem rotirenden Rade ein ganz ähnliches fest in das Rohr eingesetzt ist, dessen Schaufeln die entgegengesetzte Richtung haben wie die des rotirenden Rades, wie dies durch Fig. 187 erläutert wird. Diese unter dem Namen der Leitcurven bekannten Schaufeln des oberen, feststehenden Rades machen, daß der Druck des Wassers möglichst rechtwinklig gegen die Schaufeln des rotirenden Rades wirkt.

Fig. 187.



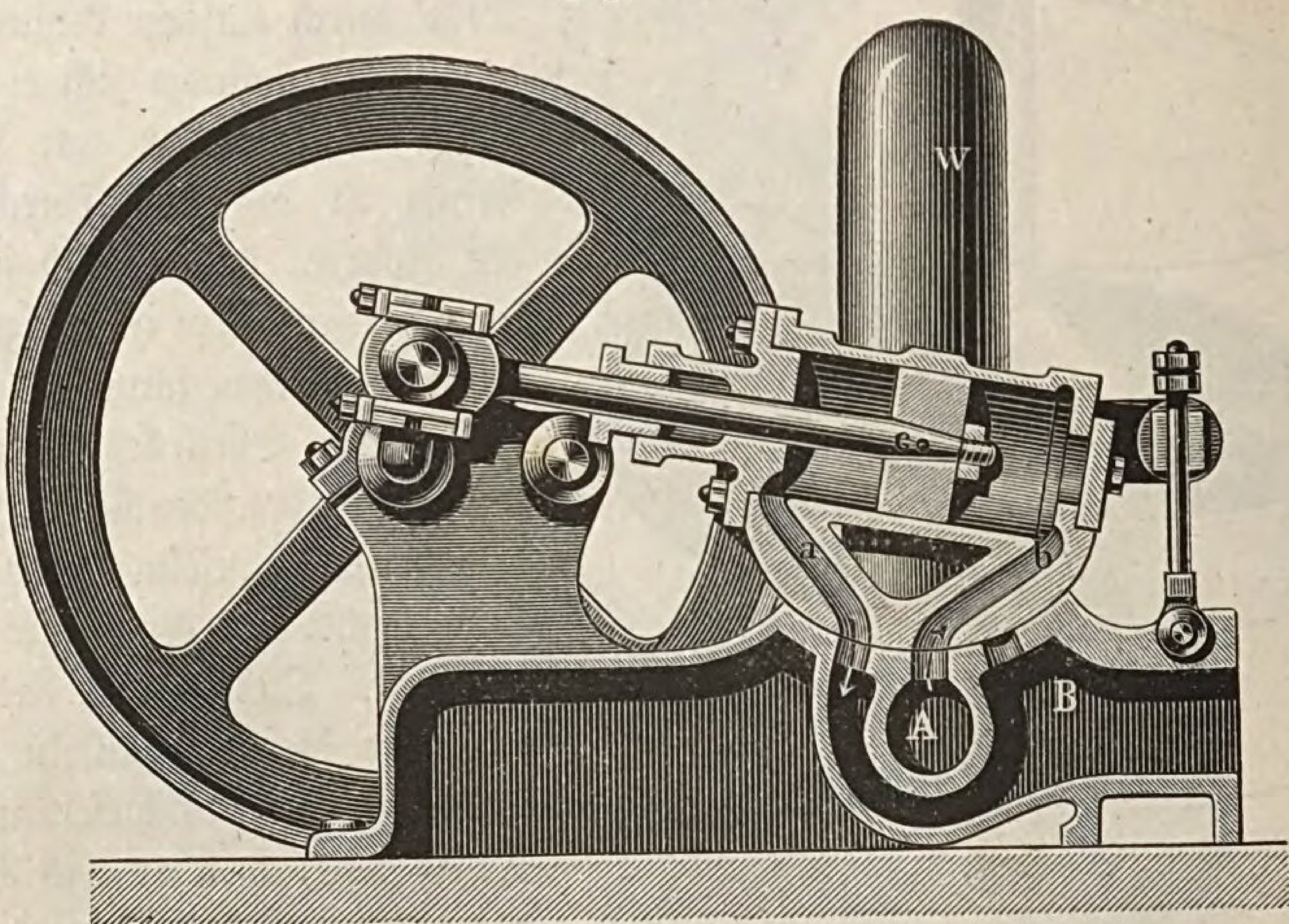
Außer der Hendschel-Jonval'schen Turbine sind noch zu nennen die Turbinen von Althans, Fourneyron, Cadiat, Girard, dann die Partialturbinen, unter denen das Tangentialrad die bekannteste ist. Wir müssen indessen auf eine eingehendere Behandlung dieses Gegenstandes verzichten, da derselbe in das Gebiet des Maschinenbaues gehört.

Die Wassermotoren. Bei den Wassermotoren ertheilt die wir- 92
kende Wassermasse, das Aufschlagwasser, durch seinen Druck einem Kolben, welcher innerhalb eines hohlen Cylinders beweglich ist, eine hin- und hergehende Bewegung, die dann von dem Kolben aus weiter übertragen wird. Unter den hierher gehörigen Maschinen hat der von Schmid in Zürich nach dem

Princip der oscillirenden Dampfmaschinen construirte Wassermotor die größte Verbreitung gefunden.

Der Cylinder der Maschine ist um eine Axe drehbar, deren Richtung in Fig. 188 in *c* zum Punkt verkürzt erscheint. Das äußere Ende der Kolben-

Fig. 188.



stange greift direct am Kurbelarme an, dessen Länge der halben Hubhöhe des Kolbens gleich ist. In der Stellung, welche unsere Figur zeigt, hat der nach links sich bewegende Kolben gerade die Mitte des Cylinders erreicht, der Kurbelarm steht rechtwinklig zur Kolbenstange, das Aufschlagwasser tritt aus der Röhrenleitung durch *A* und den Canal *b* auf der rechten Seite in den Cylinder ein,

Fig. 189.



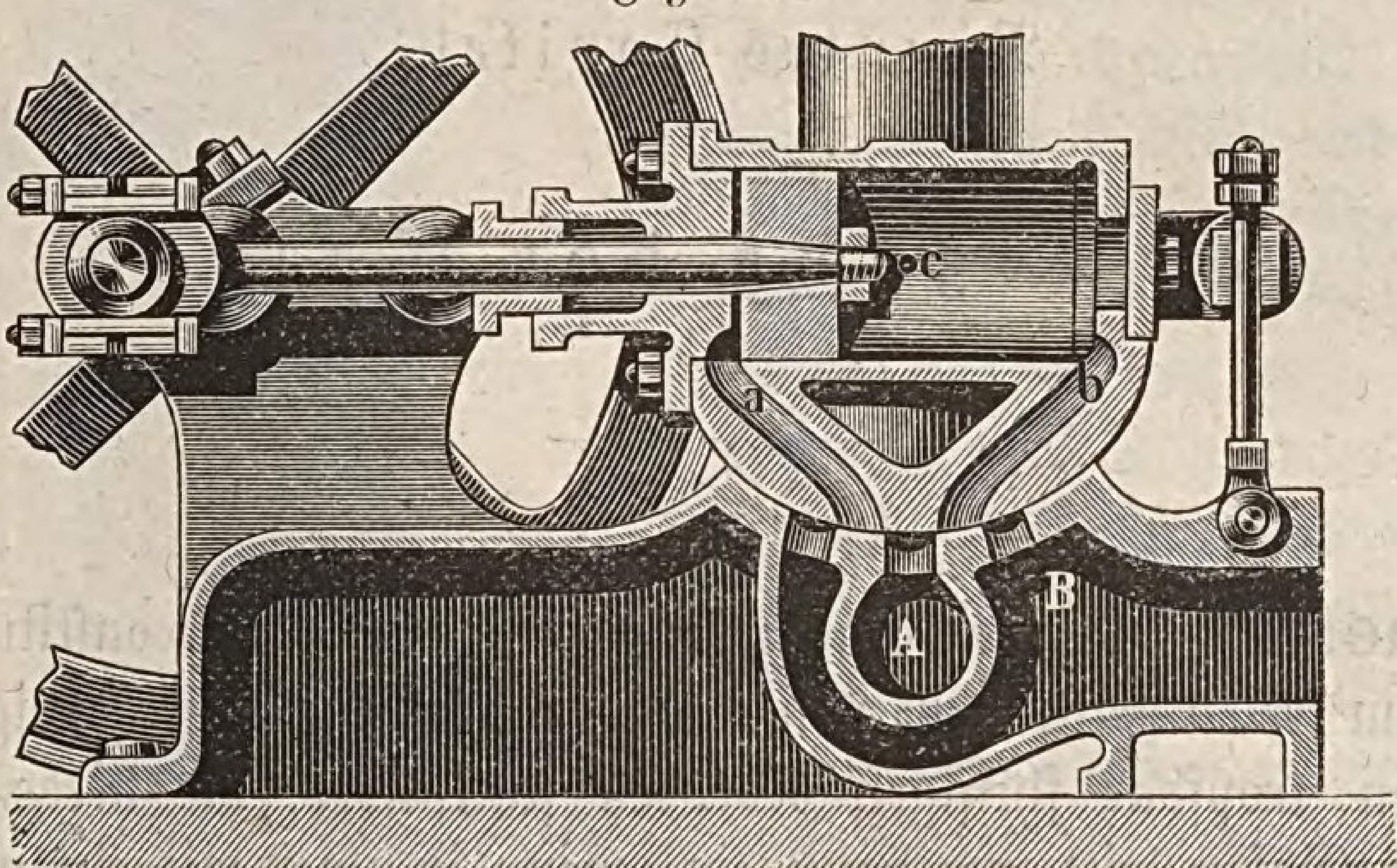
um den Kolben nach links zu treiben, während das auf der anderen Seite des Kolbens befindliche Wasser durch den Canal *a* in die Abzugsröhre *B* gelangt.

Während nun der Kolben aus der Lage Fig. 188 bis zum linken Ende des Cylinders getrieben wird, wird der Kurbelarm so weit gedreht, daß er in

die Lage Fig. 189 kommt und die Kolbenstange in die Horizontale zu liegen kommt. In diesem Moment ist das auf der unteren Seite des Cylinders angesetzte Verbindungsstück, in welchem sich die Canäle *a* und *b* befinden, in eine solche Stellung gekommen, daß alle Verbindung zwischen dem Cylinder und den Zu- und Abflußröhren unterbrochen ist.

Bei fortdauernder Rotation der Kurbel wird nun alsbald die Verbindung zwischen *b* und *B* einerseits und zwischen *a* und *A* andererseits wieder hergestellt, so daß das Wasser auf der linken Seite in den Cylinder eintritt und den Kolben nach der rechten treibt. Ist der nach rechts gehende Kolben wieder in der Mitte seiner Bahn angekommen, so sind die Zu- und Abflußcanäle des Wassers wieder ganz frei, wie Fig. 190 zeigt.

Fig. 190.



Der Strom des Wassers geht also durch den Cylinder der Maschine, deren Spiel, wie man sieht, äußerst einfach ist, bald in der einen, bald in der anderen Richtung hindurch, um jedes Mal eine Unterbrechung zu erfahren, so oft die Maschine in ihrem todten Punkte ankommt, so oft also die Richtung des Kurbelarmes mit der Richtung der Kolbenstange zusammenfällt; in dem Momente aber, in welchem der Wasserstrom unterbrochen wird, muß ein Stoß erfolgen, der nach und nach zerstörend auf die Maschine wirken müßte, wenn er nicht durch einen elastischen Körper gleichsam parirt würde. Dies geschieht nun dadurch, daß auf dem Rohre, welches der Maschine das Aufschlagwasser zuführt, ein Windkessel *W* angebracht ist, dessen oberer Theil mit Luft gefüllt ist, welche bei jeder Unterbrechung des Wasserstroms comprimirt wird, um sich dann wieder auszudehnen.

Schmid führt diese Maschinen in verschiedenen Größen aus; für die kleinsten beträgt der Hub nur 6 cm, für die größten 37 cm. Bei einer Druckhöhe von 20 m ist die Leistung der kleinsten gleich der von 0,13, bei den größten ist sie gleich der von 7 Pferdekräften; dagegen steigt die Leistung der kleinsten auf 0,6, die der größten auf 36 Pferdekräfte, wenn die Druckhöhe der Wassersäule 100 m beträgt.

Es versteht sich von selbst, daß diese Maschinen auch als Dampfmaschinen gebraucht werden können, bei welchen dann der Windkessel *W* wegfällt.

Neuntes Capitel.

Bewegung der Gase.

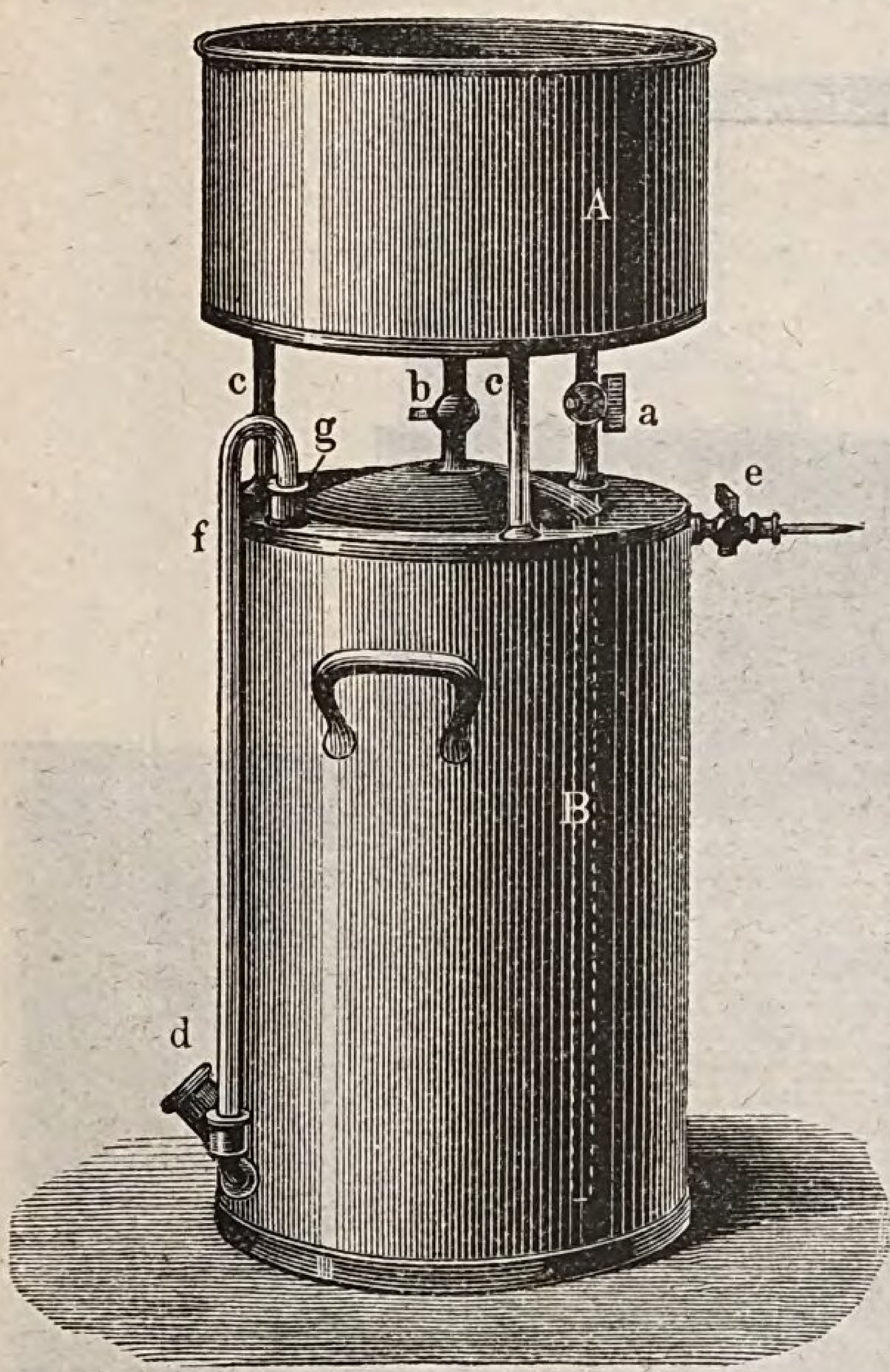
93 **Gasometer.** Bei den Gasen kann ihrer Molekularconstitution zufolge weder von einem freien Fall, noch von einem Herabfließen auf geneigten Flächen, wie es bei den tropfbar flüssigen Körpern stattfindet, die Rede sein. Eine Bewegung von Gasen tritt nur dann ein, wenn in zwei mit einander in Verbindung stehenden, mit Gasen erfüllten Räumen ein ungleicher Druck herrscht. Es wird dann das Gas von dem Raume, welcher einem stärkeren Drucke ausgesetzt ist, nach demjenigen überströmen, an welchem ein geringerer Druck stattfindet, bis das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Setzt man also einen luftverdünnten Raum mit der äußeren Atmosphäre in Verbindung, so muß Luft einströmen; hat man aber in einem Ballon mit Hülfe der Compressionspumpe die Luft verdichtet, so wird sie ausströmen, wenn man einen Hahn öffnet, welcher das Innere des Ballons mit der äußeren Luft in Verbindung bringt.

Gase, welche man in besonderen Gasbehältern, Gasometern, aufgefangen hat, werden meist durch den Druck einer Wassersäule zum Ausströmen gebracht.

Fig. 191 stellt ein kleines Gasometer dar, wie sie in chemischen Laboratorien gewöhnlich gebraucht werden. *B* ist ein Cylinder von lackirtem Blech, welcher ungefähr 50 cm Höhe und etwa 30 cm Durchmesser hat, und dessen oberer Deckel etwas nach oben gewölbt ist. Auf diesem Deckel ruht auf vier Stützen ein zweiter, oben offener Cylinder *A*, dessen Höhe aber nur $^1/_3$ von der des unteren ist. Der obere Cylinder ist mit dem unteren durch zwei Röhren verbunden, von denen die eine, *b*, gerade in der Mitte des Deckels sich befindet. Sie darf durchaus nicht in den unteren Cylinder hineinragen. Eine zweite Verbindungsröhre *a* geht fast auf den Boden des unteren Cylinders. In jeder dieser Röhren befindet sich ein Hahn, vermittelst dessen man nach Be=

lieben die Verbindung der beiden Cylinder herstellen und unterbrechen kann. Bei *e* befindet sich eine kurze horizontale Röhre, welche ebenfalls durch einen Hahn verschlossen werden kann und an welcher vorn ein Schraubengewinde eingeschnitten ist, um andere Röhren und Ausströmungsöffnungen anschrauben zu können. Nahe am Boden des unteren Cylinders befindet sich bei *d* eine aufwärts stehende Oeffnung, welche mittelst einer Schraube oder eines Korkes verschlossen werden kann.

Fig. 191.



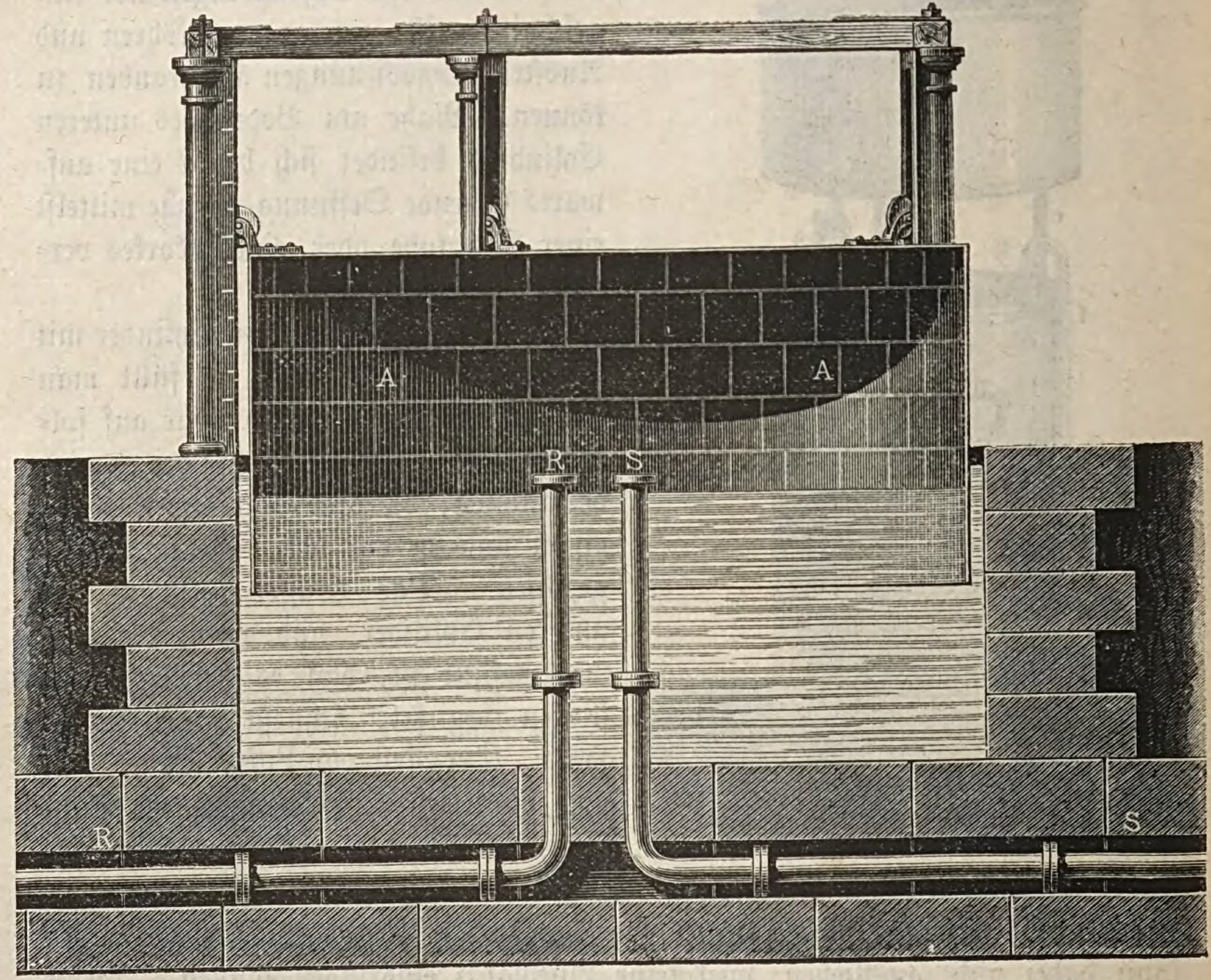
Wenn man den unteren Cylinder mit einem Gase füllen will, so füllt man ihn erst mit Wasser, und zwar auf folgende Weise. Die Oeffnung bei *d* wird verschlossen, die drei Hähne werden geöffnet und in das obere Gefäß Wasser gegossen. Das Wasser fließt in den unteren Cylinder, und wenn dieser so weit gefüllt ist, daß es bei *e* auszufließen beginnt, schließt man diesen Hahn. Der Rest von Luft, welcher nun noch im Cylinder sich befindet, entweicht durch das Rohr *b*. Ist der untere Cylinder auf diese Weise mit Wasser gefüllt, so werden die Hähne der Verbindungsröhren geschlossen und die Schraube oder der Kork bei *d* weggenommen. Wasser kann dabei nicht ausfließen, weil keine Luftblasen eindringen können. Wenn man aber bei *d* ein Gasleitungsrohr einsteckt, so wird neben diesem Rohre das Wasser ausfließen, während aus demselben fortwährend Gasblasen in den oberen Theil des Behälters aufsteigen. Auf diese Weise füllt sich der untere Cylinder mehr und mehr mit Gas. Wie weit der Cylinder mit Gas gefüllt ist, sieht man an der Glasröhre *fd*, welche mit dem Gefäße *B* oben und unten in Verbindung steht, so daß das Wasser in dieser Glasröhre gleiche Höhe hat wie im Cylinder.

Nachdem der Cylinder mit Gas gefüllt ist, wird die Oeffnung bei *d* verschlossen, der Hahn der Verbindungsröhre *a* geöffnet. Sobald nun der Hahn *e* geöffnet wird, strömt das Gas hier mit einer dem Drucke der Wassersäule in der Röhre *a* entsprechenden Geschwindigkeit aus.

Die großen Gasometer, welche man zur Gasbeleuchtung anwendet, sind nach einem anderen Principe construirt. In einem mit Wasser gefüllten Behälter ist ein unten offener, oben geschlossener, aus zusammengenieteten Platten von Eisenblech gebildeter Cylinder *A*, Fig. 192 (a. f. S.), eingetaucht. Von unten her ragen zwei Röhrenleitungen *RR* und *SS* in diesen umgestülpten Cylinder hinein, deren Mündungen sich über dem Wasserspiegel im Behälter befinden.

Durch die Röhrenleitung *RR* strömt, während die andere durch einen Hahn verschlossen ist, das Leuchtgas aus den Retorten, in welchen es erzeugt wird,

Fig. 192.



durch die Reinigungsapparate in die Höhlung des Cylinders *A* ein. In dem Maaße aber, in welchem das Gas einströmt, hebt dieses den ganzen Cylinder *A* aus dem Wasser des Behälters empor. Fünf eiserne, an dem Rande des Behälters angebrachte Säulen dienen, wie aus der Figur leicht zu ersehen ist, dem Cylinder zur Führung, so daß er sich beim Steigen nicht auf die Seite neigen kann.

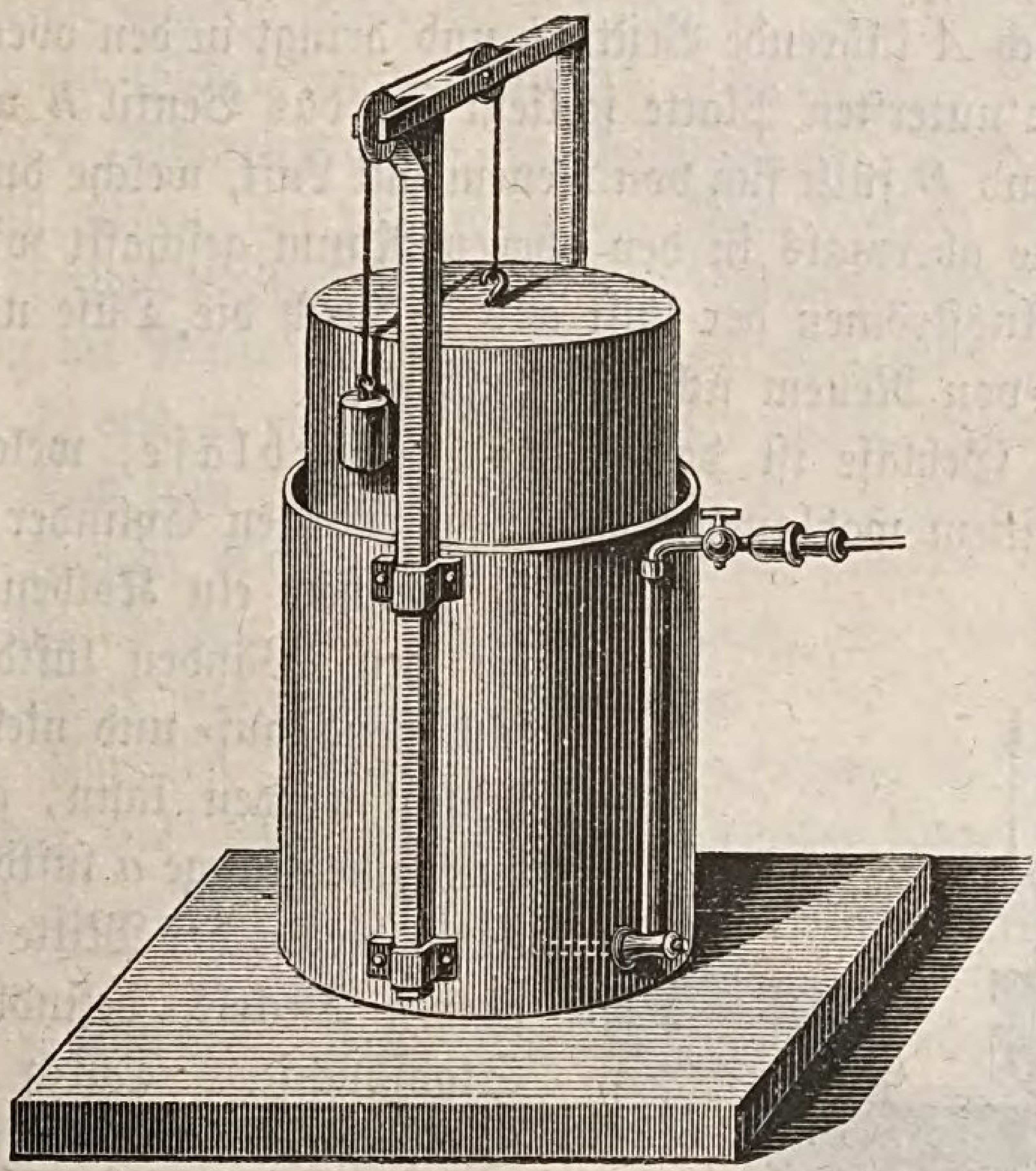
Ist das Gasometer gefüllt, so wird das Zuströmungsrohr geschlossen, der Hahn des Abströmungsrohrs, welches sich in viele enge, zu den Gasbrennern führende Röhren theilt, wird geöffnet; das Gas strömt nun durch die Röhrenleitung *SS* ab, indem es durch das Gewicht des Blechcylinders *A* comprimirt wird, in Folge dessen dann auch der Wasserspiegel in *A* um einige Zoll tiefer steht als außen. — In dem Maaße, in welchem das Gas durch die Röhrenleitung *SS* abströmt, sinkt der Cylinder *A* wieder allmälig nieder.

Der Durchmesser eines solchen Gasometers beträgt meist über 10 m.

Nach demselben Principe werden auch kleinere Gasometer für Laboratorien construirt. In Fig. 193 ist ein solcher abgebildet, und wohl ohne weitere Erklärung verständlich. Es befindet sich hier nur eine Zuleitungsröhre, aus welcher man erst das Gas ein- und nachher auch wieder ausströmen läßt.

Gebläse. Unter Gebläsen versteht man Vorrichtungen, welche dazu 94
dienen, an eine bestimmte Stelle einen mehr oder minder starken Luftstrom hinzuleiten.

Fig. 193.



Die einfachste und bekannteste Form der Gebläse ist der Blasebalg, welcher in Fig. 194 in seiner einfachsten Form dargestellt ist. Beim Aufziehen des Deckels hebt sich das im Boden angebrachte Ventil *k*, und es dringt von außen her Luft in den inneren Raum des Blasebalges; beim Niederdrücken des Deckels schließt sich die Klappe *k*, und die Luft wird durch die Düse *d* ausgetrieben. Mit einem einfachen Blasebalg kann man demzufolge keinen continuirlichen Luftstrom erzeugen, wie dies in Schmieden, in chemischen Laboratorien u. s. w. nöthig ist; man wendet in diesem Falle zusammengesetzte Blasebälge an, welche construirt sind, wie Fig. 195 zeigt. Die in der oberen Abtheilung *A* eines solchen Blasebalges enthaltene Luft wird

Fig. 194.

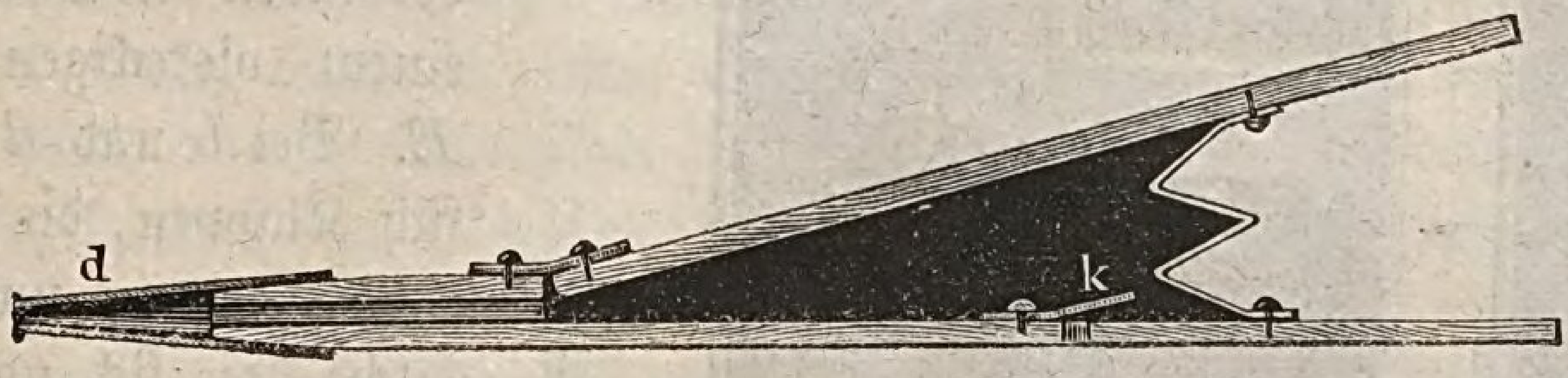
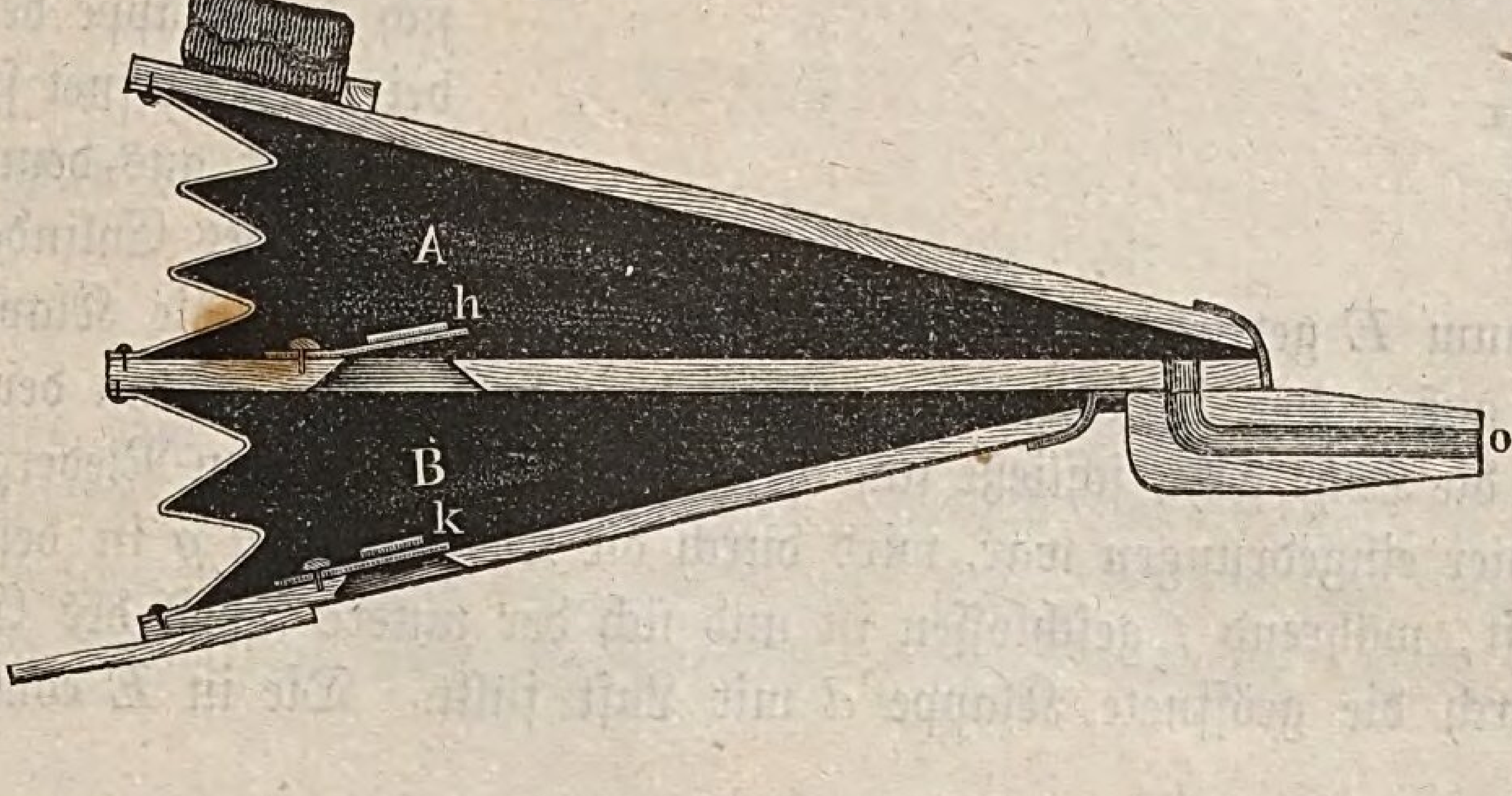


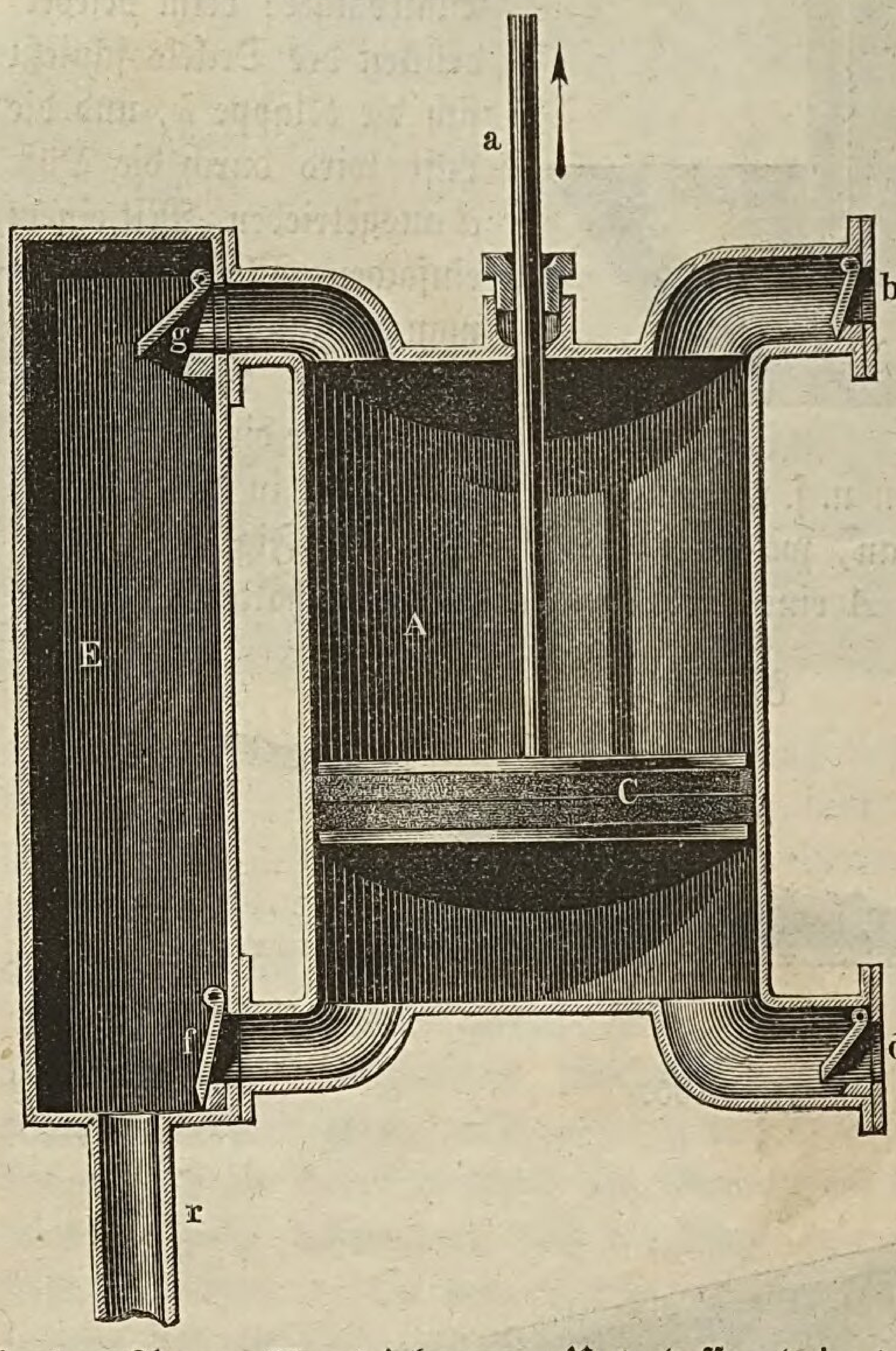
Fig. 195.



durch Gewichte, welche auf dem oberen Deckel liegen, zusammengepreßt; sie kann aber nur durch die Düse *o* entweichen, weil das Ventil *h* zwischen *A* und *B* sich schließt, sobald die Luft in *A* stärker gepreßt ist als in *B*. Wenn man die untere Platte des Raumes *B* hebt, so wird die Luft in *B* zusammengepreßt; in Folge davon hebt sie das nach *A* führende Ventil *h* und dringt in den oberen Raum. Beim Niedergange der untersten Platte schließt sich das Ventil *h* wieder, das Ventil *k* öffnet sich, und *B* füllt sich von Neuem mit Luft, welche durch Aufziehung der untersten Platte abermals in den oberen Raum geschafft wird. Man begreift leicht, daß das Ausströmen der Luft aus *A* durch die Düse nicht unterbrochen wird, während *B* von Neuem sich mit Luft füllt.

Das vollkommenste aller Gebläse ist das Cylindergebläse, welches Fig. 196 abgebildet ist. In einem wohlausgebohrten gußeisernen Cylinder *A*,

Fig. 196.



in welchem ein Kolben *C*, an den Wänden luftdicht schließend, auf- und niederbewegt werden kann, geht die Kolbenstange *a* luftdicht durch die in der Mitte des oberen Deckels befindliche Stopfbüchse. Durch die Oeffnung bei *b* communicirt der obere, durch die Oeffnung bei *d* der untere Theil des Cylinders mit der freien Luft; die Oeffnungen bei *g* und *f* aber verbinden den Cylinder mit einem viereckigen Kasten *E*. Bei *b* und *d* befinden sich Klappen, die sich nach innen, bei *g* und *f* aber solche, die sich nach außen öffnen. Wenn nun der Kolben niedergeht, schließt sich die Klappe bei *d*, die bei *f* aber öffnet sich, und alle Luft aus dem unteren Theile des Cylinders wird in den Raum *E* getrieben. — Unterdessen dringt aber durch die Klappe bei *b* Luft von außen her in den oberen Theil des Cylinders. Wenn der Kolben wieder in die Höhe geht, schließt sich *b*, und alle Luft, die beim Niedergang des Kolbens hier eingedrungen war, wird durch die Oeffnung bei *g* in den Kasten *E* geschafft, während *f* geschlossen ist und sich der untere Theil des Cylinders wieder durch die geöffnete Klappe *d* mit Luft füllt. Die in *E* comprimirte

Luft strömt durch ein am unteren Ende von E befestigtes Rohr nach dem Feuerraume.

Die Geschwindigkeit des Kolbens ist am größten, wenn er die Mitte des Cylinders durchläuft; sie nimmt um so mehr ab, je mehr er sich der oberen oder unteren Gränze seines Weges nähert. Daraus geht hervor, daß der Wind, welchen ein solcher Cylinder liefert, nicht gleichmäßig ausströmt. Da aber für die meisten Schmelzprocesse ein gleichmäßiger Windstrom nöthig ist, so muß man dafür sorgen, ihn zu reguliren. Man erreicht dies entweder dadurch, daß man an demselben Windkasten E drei Cylinder anbringt, deren Kolben nicht gleichzeitig die Mitte ihres Weges durchlaufen, oder auch dadurch, daß man die Luft aus E erst in einen Behälter treten läßt, dessen Rauminhalt sehr groß ist im Vergleich zum Volumen des Cylinders. Je größer dieser Luftbehälter ist, welcher den Namen Regulator führt, desto weniger Einfluß hat der Wechsel in der Geschwindigkeit der Kolbenbewegung auf die Gleichmäßigkeit des aus dem Regulator austretenden Luftstromes.

Um den Druck zu messen, welchem die Gase in den verschiedenen Behältern und Gasleitungsröhren ausgesetzt sind, bedient man sich der Manometer, welche bei Gebläsen auch Windmesser heißen.

Gesetze des Ausströmens der Gase. Für die Ausflußgeschwindigkeit der Gase gelten dieselben Gesetze wie bei Flüssigkeiten, d. h. die Ausflußgeschwindigkeit ist 95

$$v = \sqrt{2gs}, \qquad \qquad 1)$$

wenn s die Druckhöhe bezeichnet. Hier aber ist s eine Größe, die nicht direct durch die Beobachtung gegeben ist, wie bei tropfbar flüssigen Körpern. Für diese bezeichnet s die Höhe der Flüssigkeitssäule, deren Druck den Ausfluß bewirkt und welche von derselben Natur und Dichtigkeit ist wie die ausströmende Flüssigkeit. Gase, welche in einem Gefäße enthalten sind, sind aber nicht durch eine Luftsäule von gleichmäßiger Dichtigkeit und freier Oberfläche, sondern in der Regel durch eine Wassersäule comprimirt, deren Höhe h an einem Manometer abgelesen werden kann.

Ist das specifische Gewicht des eingeschlossenen Gases, das des Wassers $= 1$ gesetzt, gleich d, so ist die Höhe s einer Säule dieses Gases, welche einer Wassersäule von der Höhe h das Gleichgewicht hält,

$$s = \frac{h}{d};$$

mithin haben wir

$$v = \sqrt{2g\frac{h}{d}} \qquad \qquad 2)$$

Unter dem normalen Atmosphärendruck ist das specifische Gewicht der Luft 0,00129. Hat aber eine abgesperrte Luftmasse außer dem Druck der Atmosphäre, welcher bekanntlich eine Wassersäule von 10,33 m das Gleichgewicht hält, noch den Druck einer Wassersäule von h Metern zu tragen, so ist dem

Mariotte'schen Gesetz zufolge ihr specifisches Gewicht

$$d = 0{,}00129 \frac{10{,}33 + h}{10{,}33},$$

mithin ergiebt sich für die Ausströmungsgeschwindigkeit atmosphärischer Luft, welche außer dem normalen Atmosphärendruck noch den Druck einer Wassersäule von h Metern Höhe zu tragen hat,

$$v = \sqrt{2g \frac{h \,.\, 10{,}33}{0{,}00129\,(10{,}33 + h)}}.$$

Hiernach wird, wenn $h = 0{,}1$ m beträgt, $v = 38{,}79$ m, da ja $g = 9{,}8$ m ist.

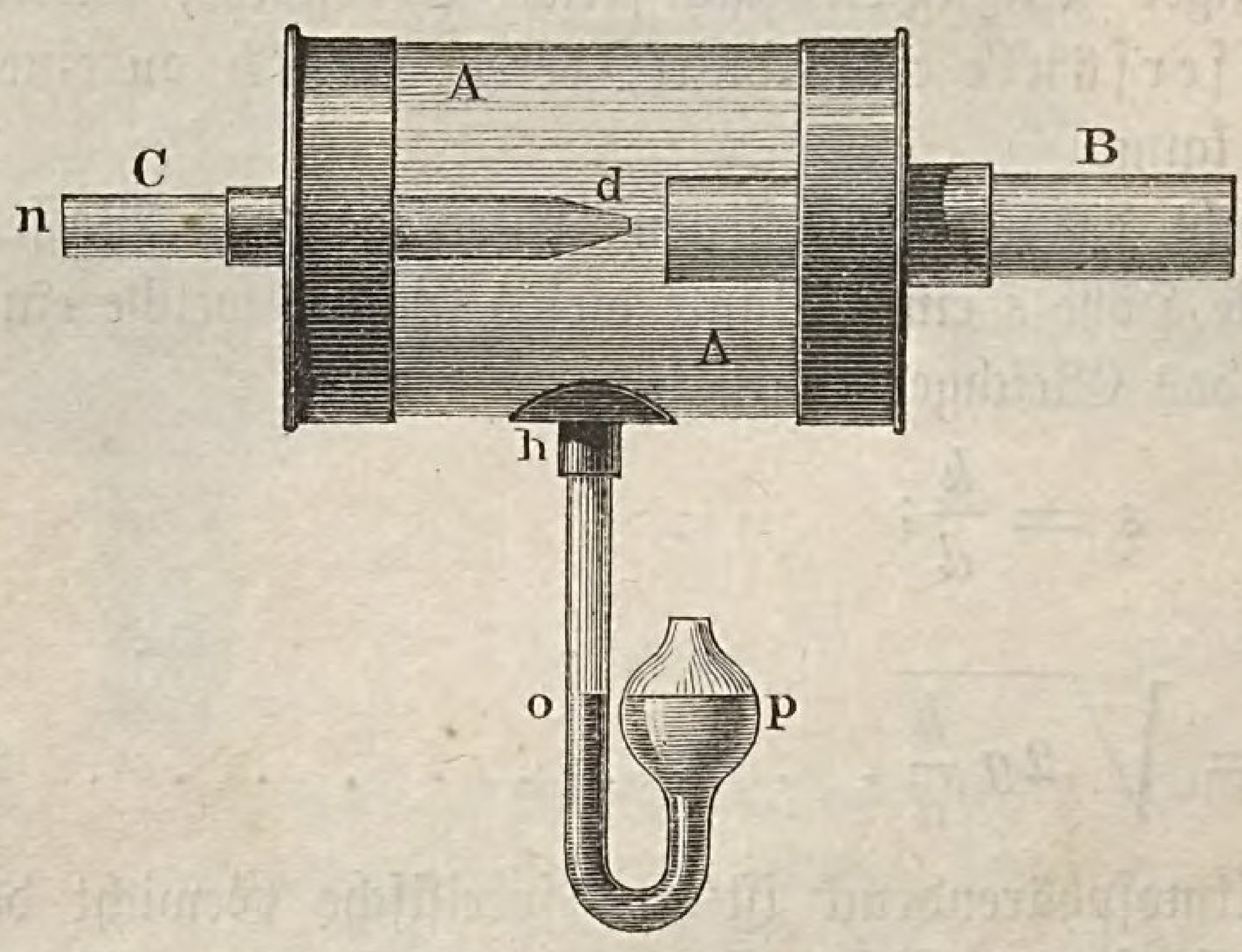
Nach Gleichung 2) ist die Ausströmungsgeschwindigkeit v' eines Gases, dessen specifisches Gewicht nicht d, sondern nd ist,

$$v' = \sqrt{2g \frac{h}{nd}} = v \sqrt{\frac{1}{n}}.$$

Wenn also verschiedene Gase unter gleichem Druck ausströmen, so ist ihre Ausströmungsgeschwindigkeit der Quadratwurzel aus ihren specifischen Gewichten umgekehrt proportional. Ein viermal leichteres Gas wird also doppelt so schnell ausströmen. Das specifische Gewicht der Kohlensäure ist 1,5, das des Wasserstoffgases dagegen ist 0,069 mal so groß als das der atmosphärischen Luft. Die Ausströmungsgeschwindigkeit der Kohlensäure ist also $\frac{v}{\sqrt{1{,}5}} = 0{,}816\, v$, die des Wasserstoffgases aber $\frac{v}{\sqrt{0{,}069}} = 3{,}8\,.\,v$, wenn v die Ausströmungsgeschwindigkeit der atmosphärischen Luft unter gleichem Druck bezeichnet.

96 **Saugen durch ausströmende Gase.** Wenn Luft oder irgend ein anderes Gas mit großer Geschwindigkeit aus irgend einem Behälter durch eine Oeffnung von entsprechender Weite ausströmt, so tritt die Erscheinung des Saugens in ähnlicher Weise auf, wie wir sie beim Ausströmen von Flüssigkeiten kennen gelernt haben. Um diese Erscheinung zu zeigen, kann man sich des Apparats Fig. 197 bedienen. Ein etwas weites, kurzes Glasrohr A ist auf beiden Seiten durch aufgekittete Kappen von Messingblech geschlossen. In die eine derselben ist die Glasröhre B, in die andere ist die noch engere Glasröhre C so eingekittet, daß die etwas

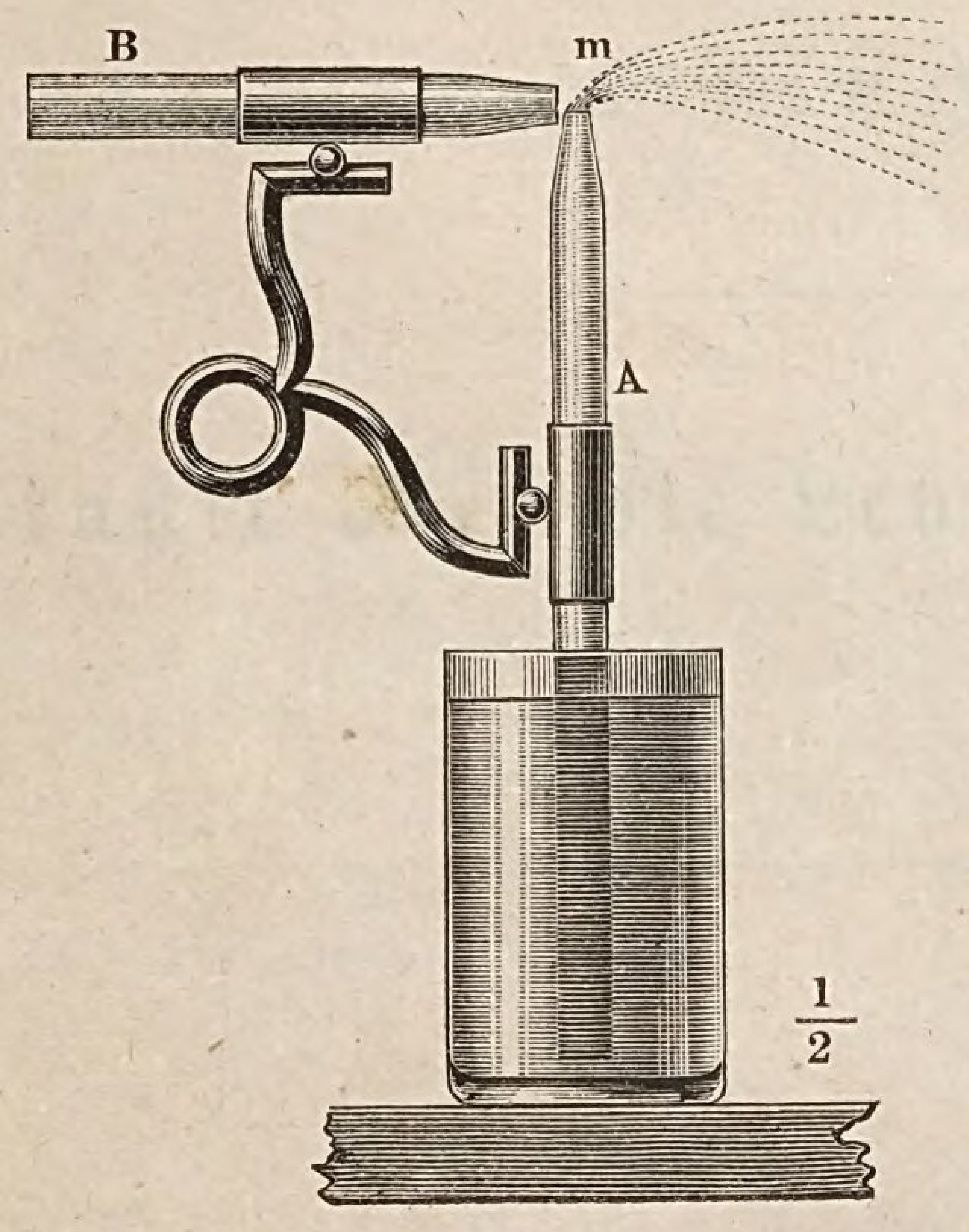
Fig. 197.



eingezogene etwa 2 mm weite Mündung *d* der Röhre *C* ganz nahe vor dem inneren Ende der Röhre *B* steht. Bei *h* ist das Rohr *A* durchbohrt und in eine hier aufgekittete Messingfassung ein auf der einen Seite kugelförmig erweitertes Manometerrohr eingekittet. Das Manometerrohr wird ungefähr bis zur Höhe *op* mit gefärbtem Wasser gefüllt. Wenn man nun bei *n* stark in das Rohr *C* hineinbläst, so sieht man alsbald, wie die Flüssigkeit im Manometerrohr von *o* aus ungefähr 4 cm hoch in die Höhe steigt, ein Beweis, daß durch das Blasen eine Luftverdünnung in *A* hervorgebracht wird.

Die Luftverdünnung rührt daher, daß der bei *d* mit ziemlicher Geschwindigkeit austretende Luftstrom, in der weiteren Röhre *B* sich ausbreitend, eine saugende Wirkung auf die Luft in *A* ausübt. Dieser Versuch erklärt sehr gut die Wirkung des sogenannten Blaserohrs der Locomotiven.

Fig. 198.



Eine in neuerer Zeit sehr verbreitete Anwendung des Saugphänomens sind auch die Flüssigkeitszerstäuber, deren einfachste Form in Fig. 198 in $1/2$ der natürlichen Größe dargestellt ist. Dicht bei der etwas verengten oberen Oeffnung des verticalen Glasrohres *A*, dessen untere Oeffnung in die zu zerstäubende Flüssigkeit eingetaucht ist, mündet das bei *m* gleichfalls etwas verengerte horizontale Glasröhrchen *B*. Wird nun kräftig in das Röhrchen *B* hineingeblasen, so strömt die Luft mit solcher Gewalt bei *m* aus, daß die Flüssigkeit in *A* nicht allein bis zur oberen Mündung dieses Röhrchens aufgesaugt, sondern auch in die feinsten Tröpfchen aufgelöst von dem Luftstrome mit fortgerissen wird.

Zweites Buch.

Akustik oder die Lehre vom Schall.

Erstes Capitel.

Fortschreitende und stehende Wellen.

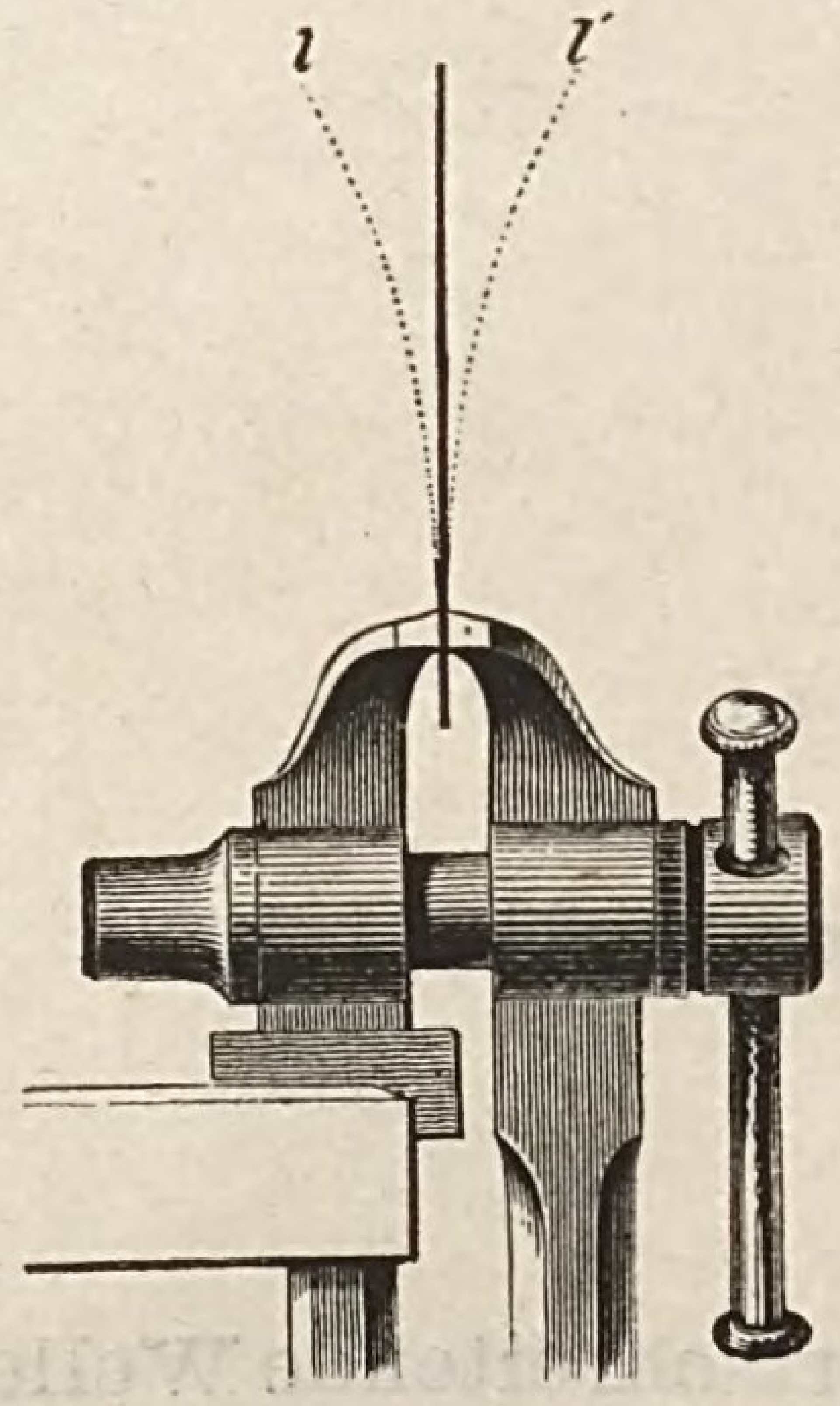
Stehende Schwingungen und fortschreitende Wellen. 97
Sobald einzelne Theilchen eines elastischen Körpers aus ihrer Gleichgewichtslage verschoben werden, so tritt eine Kraft auf, welche dieselben in die Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt. Unter dem Einfluß dieser Kraft gerathen die Theilchen in eine zitternde Bewegung, bei welcher sie innerhalb gewisser Gränzen um ihre Gleichgewichtslage hin- und herschwingen. In ihrer Gleichgewichtslage ist zwar die Kraft, welche auf sie wirkt, gleich Null, allein sie kommen hier mit einer Geschwindigkeit an, vermöge welcher sie über die Gleichgewichtslage hinausgehen, ganz ähnlich wie dies auch bei den Pendelschwingungen der Fall ist.

Wenn einzelne Theilchen eines elastischen Körpers in schwingende Bewegung versetzt werden, so bleibt letztere nicht auf dieselben beschränkt, sondern sie theilt sich den benachbarten Theilchen mit. Sind nun die Dimensionen des fraglichen Körpers so klein, daß sich die an irgend einer Stelle desselben erregte Bewegung in einer verschwindend kurzen Zeit über den ganzen Körper verbreitet, so wird eine schwingende Bewegung entstehen, bei welcher alle Theilchen *gleichzeitig durch ihre Gleichgewichtslage hindurchgehen und gleichzeitig die Gränzen ihrer Bahnen erreichen*. Von einem Körper, der eine solche Bewegung besitzt, sagt man, er befinde sich im Zustande *stehender Schwingung*. Als Beispiel stehender Schwingungen sind unter anderen die Vibrationen eines an einem Ende eingeklemmten Stahlstreifens, Fig. 199 (a. f. S.), und einer zwischen zwei festen Punkten aufgespannten Saite, Fig. 200, anzuführen.

Sind dagegen die Dimensionen des elastischen Mittels so bedeutend, daß eine namhafte Zeit vergeht, bis die an irgend einer Stelle erregte schwingende

Bewegung auf entfernte Stellen fortgepflanzt wird, so entstehen **fortschreitende Wellen**, deren Wesen darin beruht, daß **jedes folgende Theilchen dieselben Schwingungen macht** wie das **vorhergehende**, jedoch mit dem Unterschiede, daß es seine Bewegung um so später beginnt, je weiter es von dem Ursprung der Wellenbewegung entfernt ist.

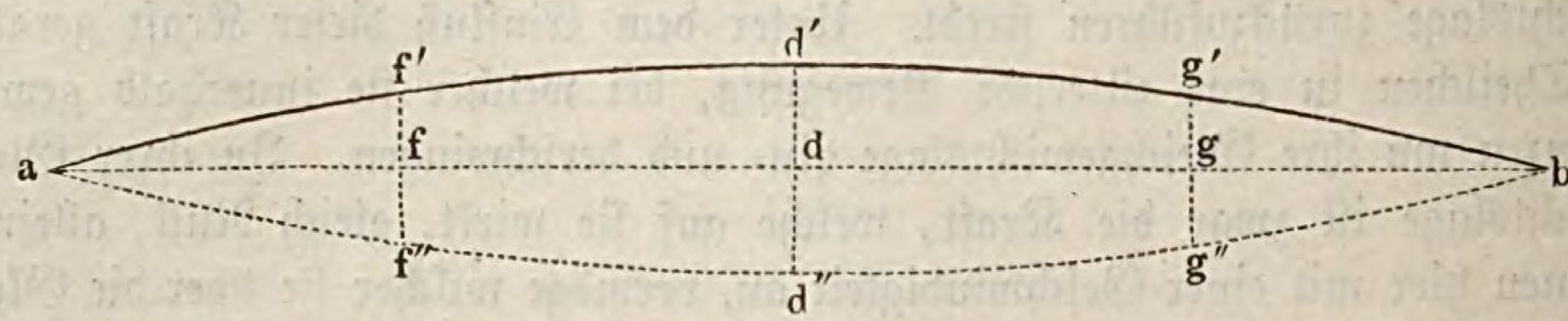
Fig. 199.



Beispiele von Wellenbewegung liefern uns eine ruhige Wasserfläche, auf welche man einen Stein fallen läßt, ein sehr langes gespanntes Seil, gegen welches man nahe an einem Ende einen kräftigen Schlag führt, die Schallwellen in der Luft u. s. w. Wir werden diese verschiedenen Wellenbewegungen alsbald näher betrachten.

Die **Schwingungsdauer** eines im Zustand stehender Schwingungen befindlichen Körpers kann nun unter Umständen größer oder kleiner sein. Ist sie groß, so daß nur wenige Schwingungen in einer Secunde ausgeführt

Fig. 200.



werden, so kann man die einzelnen Schwingungen mit dem Auge verfolgen. Ist aber die Schwingungsdauer klein, also die **Schwingungszahl**, d. h. die Zahl der in einer Secunde vollendeten Oscillatonen groß, so kann man zwar die einzelnen Oscillationen nicht mehr unterscheiden, wohl aber vermag ihre Gesammtwirkung noch einen Eindruck hervorzubringen, indem sie in den umgebenden Mitteln **Wellenbewegungen** erzeugen, durch welche sie bis zu besonders eingerichteten Sinnesorganen fortgeleitet werden und hier eine eigenthümliche Empfindung veranlassen.

So bringen die Schwingungen elastischer Körper, deren Schwingungsdauer innerhalb gewisser, unten näher zu besprechender Gränzen liegt, in der Luft oder in anderen elastischen Mitteln Wellen hervor, welche in abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen bestehen und, bis zum **Ohre** fortgepflanzt, als **Schall** wahrgenommen werden.

Noch ungleich schnellere Schwingungen der Körpertheilchen bringen, wenn sie durch die Wellenbewegung eines eigenthümlichen elastischen Fluidums, welches

wir Aether nennen (s. d. Einleitung), bis in unser Auge fortgepflanzt werden, hier den Eindruck des Lichtes hervor.

Da nun sowohl der Schall, als auch das Licht durch Wellenbewegungen fortgepflanzt werden, so wollen wir zunächst die wichtigsten Gesetze der Wellenbewegung überhaupt etwas näher betrachten. Wir beginnen diese Betrachtung mit den Wasserwellen, weil ja doch von ihnen der Begriff der Welle entnommen ist, und weil durch das Verständniß der Wasserwellen das Verständniß anderer Wellenbewegungen, namentlich der Schallwellen, welche uns hier vorzugsweise interessiren, sehr erleichtert wird.

Wasserwellen. Wird ein Stein in das ruhende Wasser geworfen, so bilden sich kreisförmige Wellen, welche von einem Mittelpunkte (der Stelle, wo der Stein ins Wasser fiel) aus nach allen Richtungen sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit verbreiten, wenn nicht irgend eine störende Ursache wirkt. Die Wellen bestehen in abwechselnden Bergen und Thälern, welche sich ziemlich rasch einander folgen und welche in der Richtung von dem Mittelpunkte nach außen hin fortschreiten. 98

Während aber ein Wellenberg als ein sich immer mehr erweiternder Ring nach außen hin fortschreitet, nehmen nicht etwa auch die einzelnen Wassertheilchen an dieser fortschreitenden Bewegung Antheil. Denn wenn ein Stückchen Holz auf dem Wasser schwimmt, so sieht man, wie es abwechselnd gehoben wird und sich dann wieder senkt, während Wellenberge und Wellenthäler gleichsam unter ihm wegziehen.

Die Kraft, durch welche die Wasserwellen hier fortgepflanzt werden, ist die Schwere; denn sobald durch irgend eine Ursache in der horizontalen Wasserfläche eine Erhöhung oder Vertiefung hervorgebracht ist, so sucht die Schwere der einzelnen Wassertheilchen die gestörte, horizontale Ebene wieder herzustellen; dadurch wird eine Oscillationsbewegung hervorgebracht, welche sich dann von Theilchen zu Theilchen fortpflanzt.

Haben sich einmal regelmäßige Wellen gebildet, so beschreiben die einzelnen Wassertheilchen an der Oberfläche während des Fortschreitens der Welle in sich zurückkehrende Curven, welche im Falle der größten Regelmäßigkeit Kreise sind; nur in solchen Fällen, in welchen der dem Gipfel vorangehende Theil des Wellenbergs dem folgenden nicht gleich ist, beschreiben die einzelnen Wassertheilchen unregelmäßige, nicht geschlossene Curven.

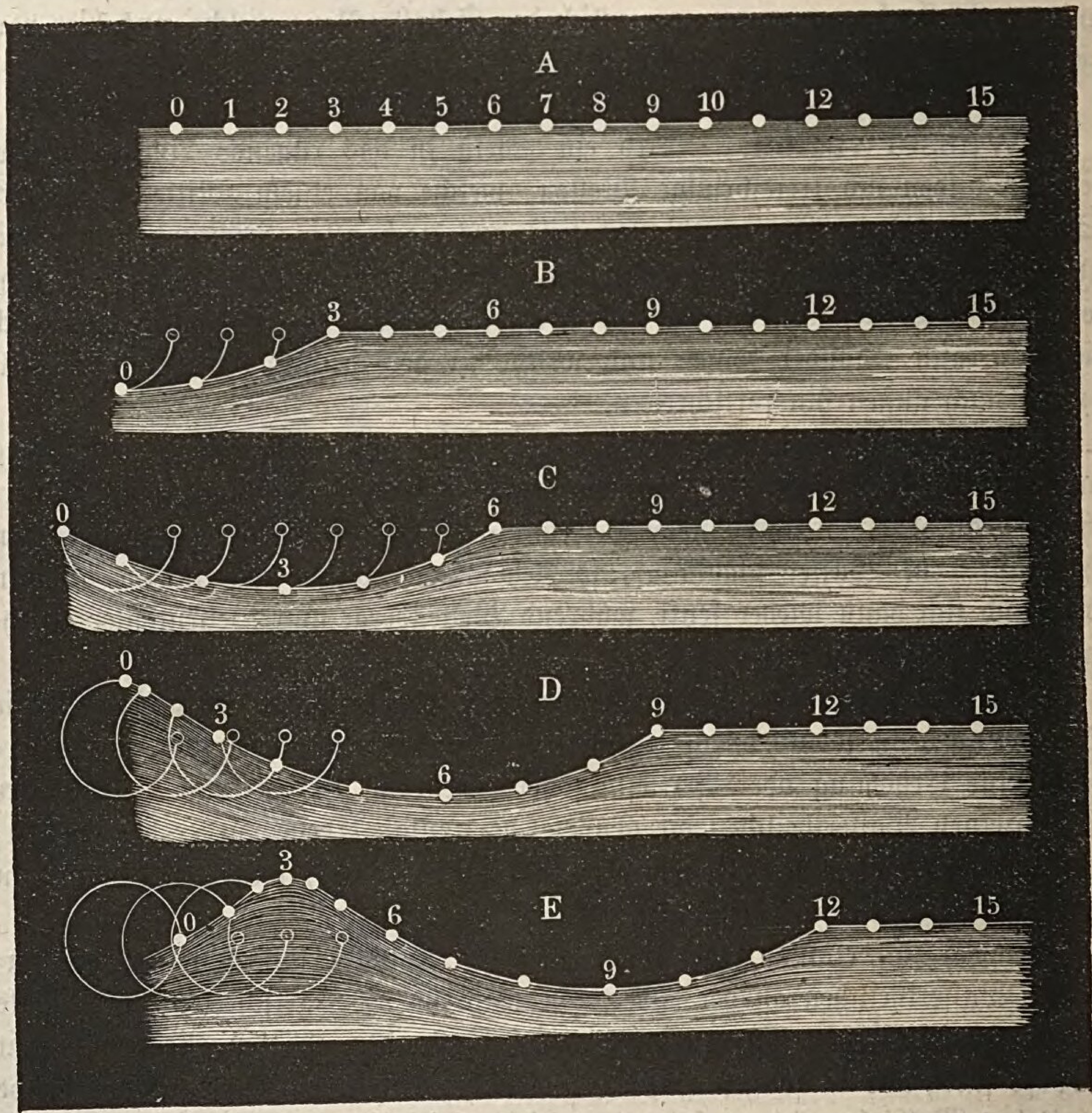
Betrachten wir nun den Zusammenhang zwischen der Bewegung der einzelnen Wassertheilchen und dem Fortschreiten der Welle etwas genauer.

Nehmen wir an, eine ganz regelmäßige Wellenbewegung habe sich, von der Linken zur Rechten fortschreitend, bis zu dem Wassertheilchen 0, Fig. 201 (a. f. S.), fortgepflanzt und veranlasse nun dieses Theilchen, eine kreisförmige Bahn zurückzulegen. Während das Theilchen 0 zum ersten Male seine Kreisbahn vollendet, wird sich die Bewegung um eine bestimmte Strecke fortpflanzen. Das mit 12 bezeichnete Wassertheilchen sei dasjenige, bis zu welchem sich die Oscillation von 0 aus fortpflanzt, während 0 eine Umdrehung vollendet;

es wird alsdann 12 seine erste Umdrehung in demselben Zeitpunkte beginnen, in welchem 0 seine zweite Umdrehung beginnt.

Denken wir uns den Umfang des Kreises, welchen das Theilchen 0 beschreibt, und ebenso den Raum zwischen 0 und 12 in zwölf gleiche Theile getheilt, so wird die Wellenbewegung in der Richtung von 0 nach 12 immer

Fig. 201.



um eine Abtheilung weiter schreiten, während das mit 0 bezeichnete Theilchen $^1/_{12}$ seiner kreisförmigen Bahn zurücklegt.

Während das Theilchen 0 das erste Zwölftel seiner Bahn zurücklegt, pflanzt sich die Wellenbewegung bis 1, während 0 das erste Viertel seiner Bahn zurücklegt, pflanzt sie sich bis 3 fort.

Fig. 201 B stellt den Zeitpunkt dar, in welchem das Theilchen 0 den vierten Theil oder $^3/_{12}$ des Kreises zurückgelegt hat, den es durchlaufen soll; das Theilchen 1 hat in diesem Augenblicke $^2/_{12}$, das Theilchen 2 aber erst $^1/_{12}$ seiner Kreisbahn zurückgelegt, das Theilchen 3 dagegen hat seine Gleichgewichtslage noch gar nicht verlassen.

Die Fig. 201 C stellt die Lage der Theilchen in dem Zeitpunkte dar, in welchem das Theilchen 0 die Hälfte seiner Bahn zurückgelegt hat; das Theilchen 1 hat $^{5}/_{12}$, das Theilchen 2 hat $^{4}/_{12}$, das Theilchen 3 hat $^{3}/_{12}$ seiner Bahn zurückgelegt; die Theilchen 4 und 5 befinden sich in derselben Lage wie die Theilchen 1 und 2 der vorigen Figur. Das Theilchen 6 ist noch nicht aus seiner Gleichgewichtslage entfernt, beginnt aber eben seine Bewegung.

Hier hat das Theilchen 3 seine tiefste Lage erreicht, bei 3 also ist die Mitte eines Wellenthals.

Wenn nun abermals $^{1}/_{12}$ der Umlaufszeit eines Theilchens vergangen ist, so wird das Theilchen 3 in eine solche Lage gegen seine ursprüngliche Stellung gekommen sein, wie es jetzt für das Theilchen 2 der Fall ist; das Theilchen 4 ist um $^{1}/_{4}$ Kreis von seiner Gleichgewichtslage entfernt und hat seine tiefste Lage erreicht; das Wellenthal ist also in diesem Zeittheilchen von 3 bis 4 fortgerückt.

Fig. 202.

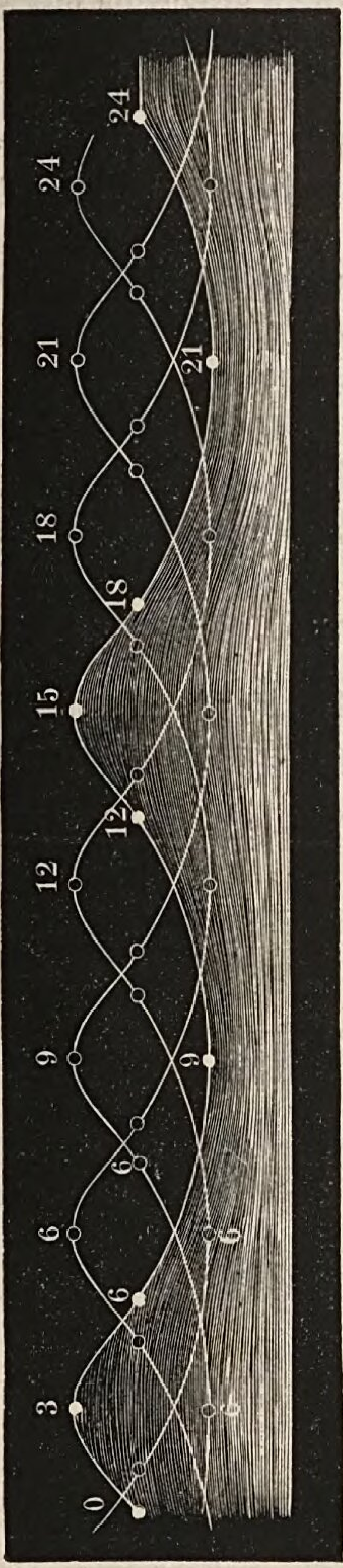


Fig. 201 D stellt den Zeitpunkt dar, wo das Theilchen 0 gerade $^{3}/_{4}$ seines Weges zurückgelegt und den höchsten Punkt seiner Bahn erreicht hat; hier ist also jetzt der Gipfel eines Wellenberges. Das Theilchen 1 hat bereits $^{8}/_{12}$, 2 hat $^{7}/_{12}$, 3 hat $^{6}/_{12}$ seiner Bahn zurückgelegt; die Theilchen 4, 5, 6, 7, 8 befinden sich in derselben Lage wie 1, 2, 3, 4 und 5 der vorigen Figur. Von dem Zeitpunkte an, auf welchen sich Fig. 201 C bezieht, bis zu demjenigen, welchen Fig. 201 D darstellt, ist das Wellenthal von 3 bis 6 fortgerückt.

Während das Theilchen 0 das letzte Viertel seiner Bahn zurücklegt, schreitet der Wellenberg von 0 bis 3, das Wellenthal von 6 bis 9 fort, und in demselben Zeitpunkte, wo 0 seine Bahn zum ersten Male zurückgelegt hat und seinen Weg zum zweiten Male beginnt, wird das Theilchen 12 zum ersten Male seine Bewegung antreten.

Dieser Zeitpunkt ist in Fig. 201 E dargestellt, welche wohl keiner Erläuterung mehr bedarf.

Die Fig. 202 stellt den Zeitpunkt dar, in welchem 0 zum zweiten Male seine Bahn zurückgelegt hat; das Theilchen 12 wird dann seinen Weg zum ersten Male gemacht und die Bewegung überhaupt sich bis 24 fortgepflanzt haben: ein Wellenberg ist in 3, ein zweiter in 15; ein Wellenthal ist in 9, ein zweites in 21.

Wenn nun die Wellenbewegung ungestört fortdauert, so werden dadurch, daß die einzelnen

Wassertheilchen fortfahren, ihre Kreisbahnen zu durchlaufen, die Wellenberge sowohl als die Wellenthäler gleichmäßig in der Richtung von der Linken zur Rechten fortschreiten, indem ein Theilchen nach dem anderen den höchsten oder tiefsten Punkt seiner Bahn erreicht.

So schreitet denn Wellenberg und Wellenthal dadurch voran, daß allen Wassertheilchen dieselbe Kreisbewegung mitgetheilt wird, daß aber jedes folgende Theilchen dieselbe später beginnt als das vorangehende.

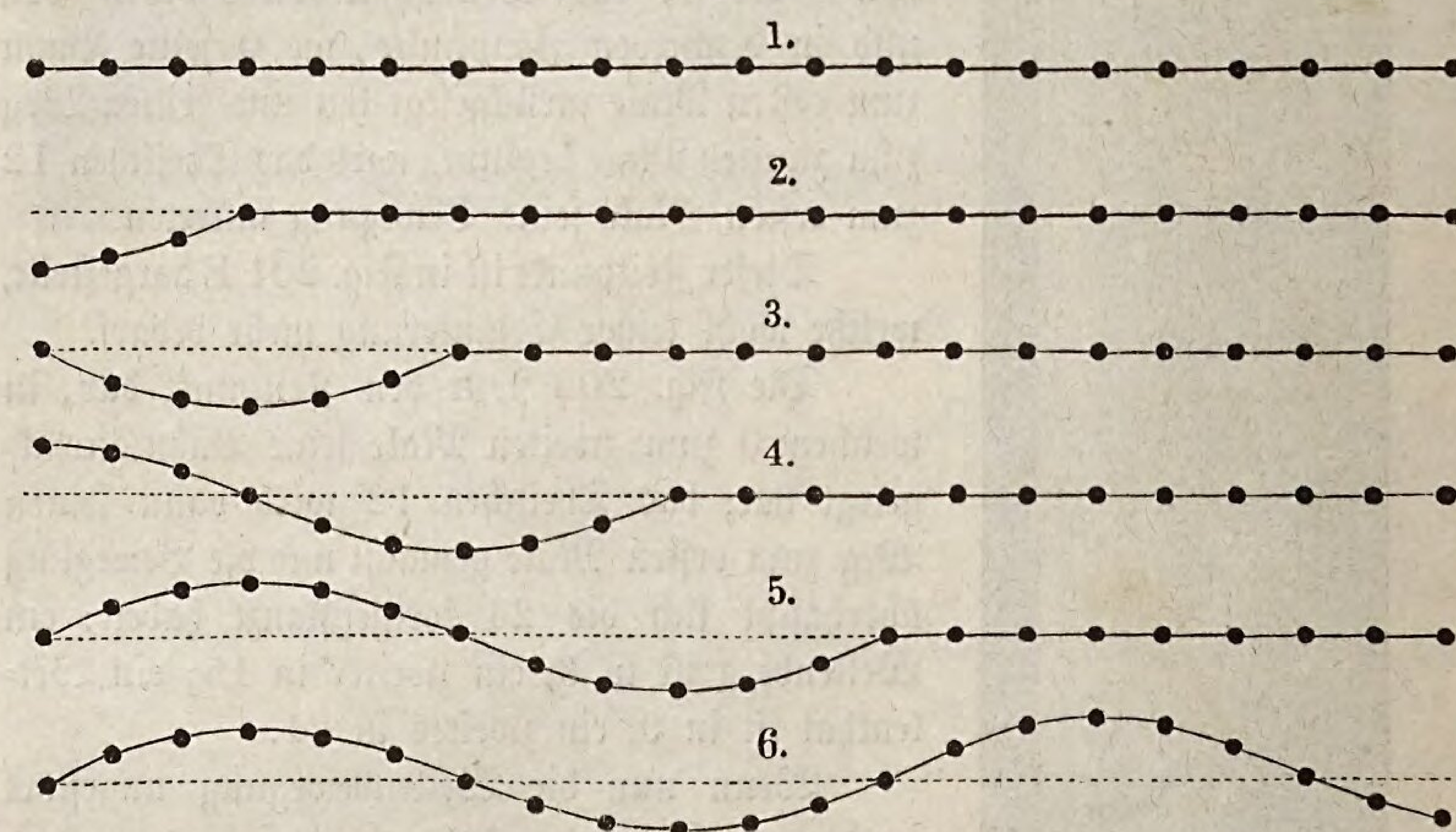
Die Entfernung von einem Theilchen bis zum nächsten, welches sich mit ihm in gleichen Schwingungszuständen befindet, also die Entfernungen von 0 bis 12, von 12 bis 24 heißt eine Wellenlänge. Solche Theilchen, welche um eine Wellenlänge von einander entfernt sind, vollenden gleichzeitig ihre Oscillation, sie erreichen gleichzeitig ihren tiefsten und ihren höchsten Stand. Demnach ist auch die Entfernung von dem Gipfel eines Wellenberges bis zum nächsten, also in Fig. 202 von 3 bis 15, von der Mitte eines Wellenthales bis zur Mitte des nächsten Wellenthales, also hier von 9 bis 21, eine Wellenlänge.

Solche Theilchen, welche um $^1/_2$ Wellenlänge von einander entfernt sind, wie 0 und 6, 3 und 9, 9 und 15, befinden sich stets in entgegengesetzten Schwingungszuständen. Das Theilchen 9 z. B. bildet eben den tiefsten Punkt eines Wellenthales, 3 und 15 dagegen den Gipfel eines Wellenberges. Die Theilchen 0 und 6 befinden sich zwar beide in der Höhe ihrer Gleichgewichtslage, allein die Bewegung von 0 ist nach unten, die von 6 ist nach oben gerichtet. Von besonderer Wichtigkeit ist noch folgender Hauptsatz:

Während ein Theilchen eine Oscillation vollendet, schreitet die Welle um eine Wellenlänge voran.

99 **Seilwellen.** Es ist schon bemerkt worden, daß die Bahnen der Wassertheilchen nicht immer, wie wir in unseren Zeichnungen annahmen, genau kreis-

Fig. 203.



förmig, ja nicht einmal immer in sich selbst zurückkehrende Curven sind. Häufig geht die kreisförmige Bahn in eine elliptische über, indem bald der horizontale, bald der verticale Durchmesser der größere ist. Wäre der horizontale Durchmesser gleich Null, so würden die einzelnen Theilchen nur rechtwinklig zu der Richtung, nach welcher sich die Wellen fortpflanzen, auf und nieder oscilliren. Durch eine derartige Bewegung werden die Wellen fortgepflanzt, welche entstehen, wenn man einen kräftigen Schlag gegen das eine Ende eines sehr langen gespannten Seiles führt. Später werden wir auch eine solche Wellenbewegung bei der Lehre vom Lichte näher kennen lernen.

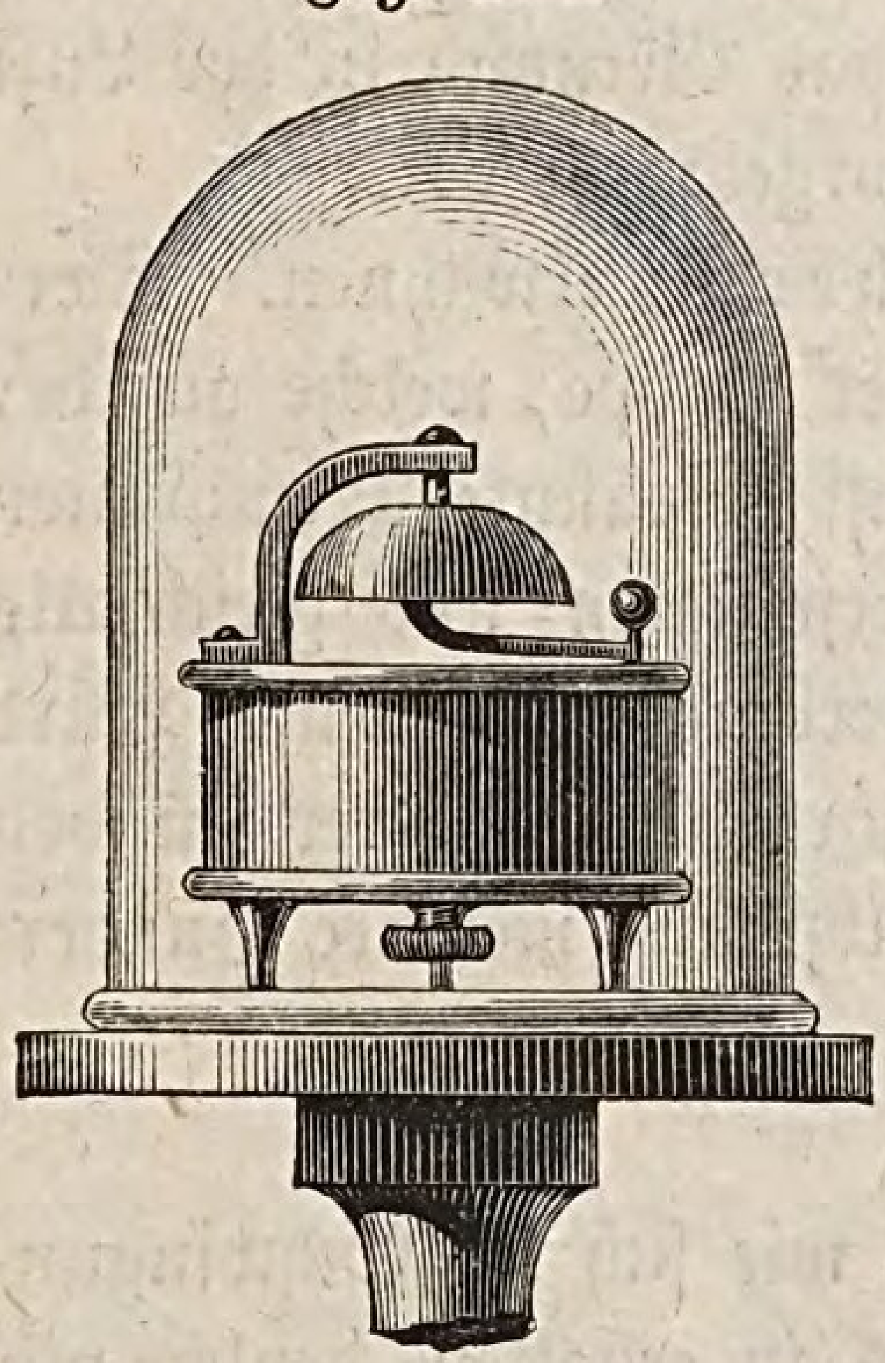
Die Curven 1 bis 6, Fig. 203, sollen dazu dienen, die Fortpflanzung solcher Wellen, also etwa der Seilwellen, anschaulich zu machen. Diese Curven entsprechen ganz genau den Figuren 201 und 202, sie lassen sich aus diesen ableiten, wenn man den horizontalen Theil der Bewegung gleich Null setzt, und werden deshalb auch ohne weitere Erklärung verständlich sein.

Wenn eine Seilwelle, gegen den einen Befestigungspunkt fortschreitend, an demselben angekommen ist, so wird sie reflectirt; sie kehrt wieder nach dem anderen Ende zurück und läuft so mehrmals hin und her.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der fortschreitenden Seilwellen ist zu groß, als daß man sie an Seilen oder gespannten Saiten von geringer Länge noch beobachten könnte; bei solchen bilden sich stehende Schwingungen, auf deren Besprechung wir später zurückkommen werden.

Fortpflanzung des Schalles. Jeder Körper, welcher sich im Zustande stehender Schwingungen befindet, veranlaßt in dem ihn umgebenden elastischen materiellen Mittel eine Wellenbewegung, welche, bis zu unserem Ohre fortgepflanzt, die Empfindung des Schalles hervorbringt. In der Regel ist es freilich die Luft, in welcher sich die Schallwellen bis zu unserem Gehörorgane fortpflanzen; doch sind auch alle anderen elastischen Körper, feste sowohl wie flüssige, fähig, den Schall mehr oder weniger gut zu leiten. **100**

Fig. 204.



Durch stehende Schwingungen elastischer Körper wird also der Schall erzeugt, durch eine Wellenbewegung elastischer Mittel wird er fortgepflanzt.

Zur Fortpflanzung des Schalles sind der Schwere unterworfene Mittel unbedingt erforderlich; das Vacuum, welches nur mit Aether erfüllt ist, kann den Schall nicht leiten.

Um dies zu zeigen, setze man auf den Teller der Luftpumpe ein aufgezogenes Weckerwerk, Fig. 204, jedoch so, daß die Füße desselben nicht direct auf dem Teller aufstehen, sondern auf einem Kissen von Wolle oder Kattun oder auch auf einigen auf einander gelegten Plättchen von dickem vulcanisirten Kautschuk.

Durch das Uhrwerk wird ein Hammer, welcher sich bei unserer Vorrichtung im Inneren der Glocke befindet, bald auf der einen, bald auf der anderen Seite derselben angeschlagen. Der dadurch erzeugte Schall wird sogleich schwächer, wenn man die gläserne Luftpumpenglocke aufsetzt, aber immerhin bleibt er noch deutlich hörbar; wird aber nun evacuirt, so verschwindet der Ton vollständig. Läßt man die Luft allmälig wieder eintreten, so unterscheidet man alsbald den Ton, welcher stärker und stärker wird, wenn sich die Glocke mehr und mehr mit Luft füllt. Der Schall kann sich also nicht durch den leeren Raum fortpflanzen.

Der größte Lärm auf der Erde kann sich demnach nicht über die Gränzen unserer Atmosphäre verbreiten, und von keinem anderen Himmelskörper kann auch nur das mindeste Geräusch bis zu unserer Erde dringen; die furchtbarsten Explosionen könnten auf dem Monde stattfinden, ohne daß wir etwas davon hören.

Saussure (1740 bis 1799) erzählt, daß auf dem Gipfel des Montblanc ein Pistolenschuß weniger Geräusch macht, als wenn man in der Ebene ein Kinderkanönchen losschießt, und Gay-Lussac fand, mit seinem Ballon in einer Höhe von 7000 m, also in einer sehr verdünnten Luft schwebend, daß die Intensität seiner Stimme ungemein abgenommen hatte.

Andere Gase und Dämpfe leiten den Schall eben so gut, wie atmosphärische Luft, wovon man sich überzeugen kann, wenn man in das Vacuum, in welchem sich das gehende Weckerwerk, Fig. 204, befindet, verschiedene Gase oder Dämpfe eintreten läßt.

Im Wasser pflanzt sich der Schall sehr gut fort; die Taucher hören, was am Ufer gesprochen wird, und am Ufer hört man deutlich, wenn in großen Tiefen zwei Steine an einander geschlagen werden.

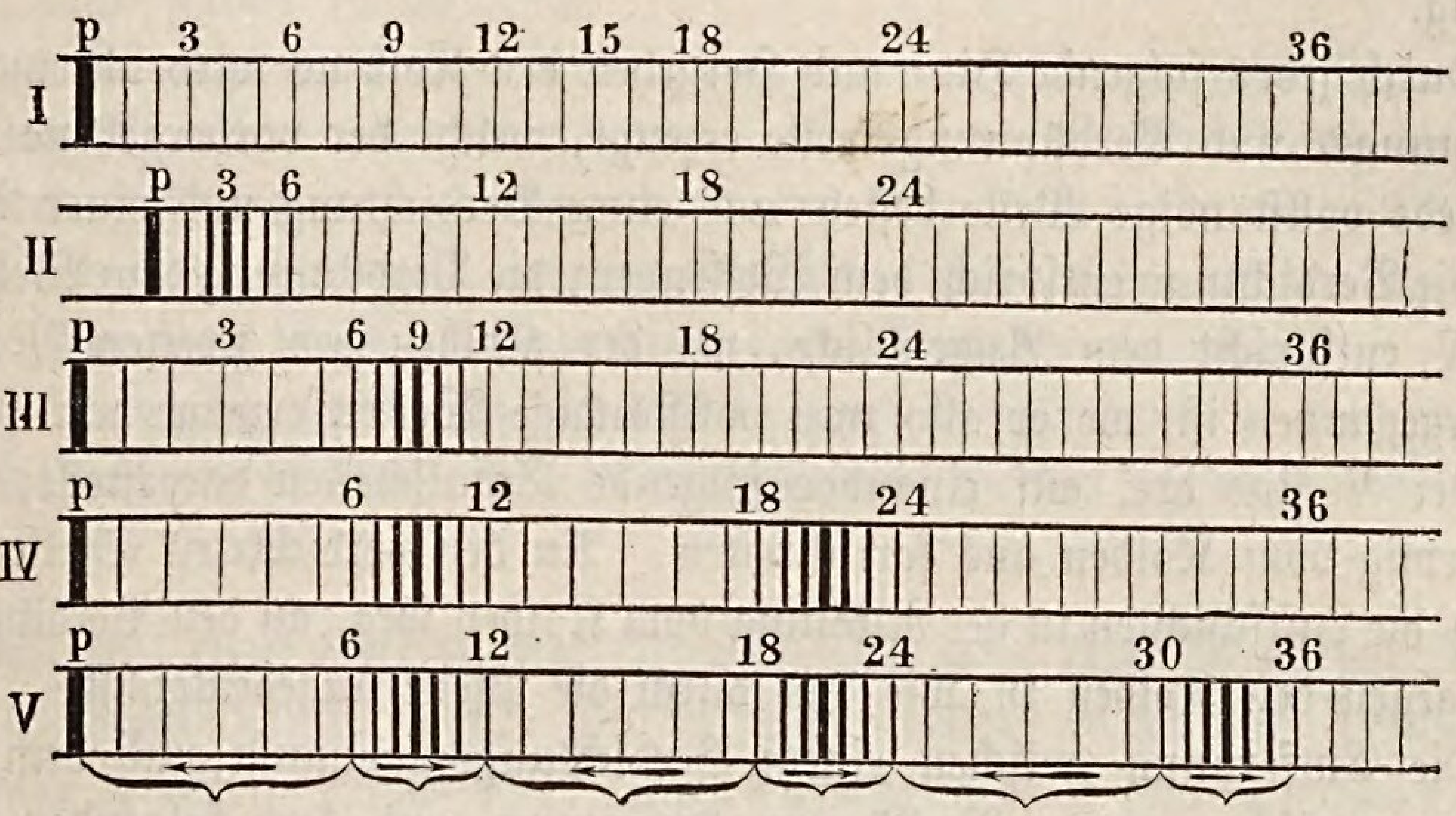
Die festen Körper endlich können den Schall nicht blos erzeugen, sondern auch fortpflanzen. Wenn man an das eine Ende eines 20 bis 25 m langen Balkens das Ohr hält, während am anderen Ende schwach angeklopft wird, so hört man das Klopfen sehr deutlich, selbst wenn das Geräusch in der Luft so schwach ist, daß es der kaum hört, welcher es hervorgebracht hat.

Hier ist auch noch der sogenannte Fernsprecher zu erwähnen. Derselbe besteht aus zwei Hohlcylindern von Metall oder Pappe, welche auf der einen Seite offen, auf der anderen dagegen durch straff gespannte Membranen verschlossen sind, die durch einen in ihrer Mitte befestigten und gleichfalls möglichst stark gespannten Faden mit einander in Verbindung stehen. Wird nun in den einen Hohlcylinder hineingesprochen, während der Hörer an den anderen Hohlcylinder das Ohr hält, so nimmt er selbst auf mehrere Hundert Meter eine deutliche Uebertragung der Sprache wahr.

101 **Luftwellen.** Um von der Art und Weise, wie sich die Schwingungen in der Luft fortpflanzen, eine deutliche Vorstellung zu erhalten, denken wir uns eine offene Röhre, in welcher die darin enthaltene Luft durch einen hin- und herschwingenden Kolben in Wellenbewegung versetzt wird.

In Fig. 205 ist eine solche Röhre dargestellt; die bei I gleichweit von einander stehenden Striche stellen einzelne Schichten der überall gleich dichten

Fig. 205.



Luft dar; *p* ist der Kolben. Dieser Kolben soll nun aus der Stellung bei I in die bei II, dann wieder zurück in seine ursprüngliche Lage und so fort rasch hin- und hergehen; diese Bewegung wird sich dann nach und nach auf alle folgenden Luftschichten so fortpflanzen, daß sie zwar in derselben Weise hin und her schwingen, jedoch ihre Schwingungen um so später beginnen, je weiter sie vom Kolben entfernt sind.

Wenn der Kolben sich aus seiner ursprünglichen Lage nach der Rechten bewegt, so würde gleichzeitig ein Theil der Luft aus der Röhre hinausgeschoben werden, wenn die Luft nicht elastisch wäre; weil aber die Luft elastisch ist, so pflanzt sich die Bewegung nur allmälig auf die folgenden Schichten fort, und so entsteht vor dem Kolben eine Verdichtung, wie dies bei II angedeutet ist, wo der Kolben seine äußerste Stellung rechts soeben erreicht hat, während die Luftschicht 6 noch in ihrer ursprünglichen Lage ist, alle zwischen dem Kolben und 6 liegenden Luftschichten aber schon nach der Rechten verschoben sind.

Weil die Luft zwischen dem Kolben und 6 verdichtet ist, so wirkt sie fortstoßend auf die folgenden Luftschichten; es werden der Reihe nach die Theilchen 6, 7, 8, 9 u. s. w. nach der Rechten fort getrieben, und so schreitet die Verdichtung in der Röhre von Schicht zu Schicht nach der rechten Seite hin fort.

Bei II sehen wir, wie das Maximum der Verdichtung zwischen dem Kolben und 6 in der Mitte, also bei 3 ist; während aber die Verdichtung nach der Rechten fortschreitet, geht der Kolben zurück, und diese rückgängige Bewegung pflanzt sich der Reihe nach auf die Schichten 1, 2, 3, 4 u. s. w. fort.

Während also, von der Stellung II ausgehend, das Dichtigkeitsmaximum nach der Rechten fortschreitet, indem die Schichten 6, 7, 8, 9 u. s. w. der Reihe nach sich nach rechts verschieben, gehen die Theilchen 1, 2, 3 u. s. w. schon wieder nach links; es muß also durch die rückgängige Bewegung des Kolbens eine V e r d ü n n u n g entstehen, welche, der Verdichtungswelle folgend, gleichfalls nach der rechten Seite hin fortschreitet.

Bei III ist der Zeitpunkt dargestellt, in welchem der Kolben zum ersten Male einen Hin- und Hergang vollendet hat; die Bewegung ist bis zur Luftschicht 12 fortgeschritten; bei 9 ist die größte Verdichtung, bei 3 die größte Verdünnung.

Durch jedes folgende Hin- und Hergehen des Kolbens wird abermals eine Verdichtungs- und Verdünnungswelle erzeugt, welche der vorhergehenden folgt.

Jede vollständige Welle besteht aus einer Verdichtung und einer Verdünnung; die Verdichtung entspricht dem Wellenberg, die Verdünnung dem Wellenthal.

IV entspricht dem Augenblicke, wo der Kolben zum zweiten Male hin- und hergegangen ist, wo er also zwei vollständige Wellen erzeugt hat.

Bei V sind drei auf einander folgende Schallwellen dargestellt, die alle gleichförmig vom Kolben aus fortschreiten. An den verdichteten Stellen bewegen sich die Luftschichten in der Richtung vom Kolben weg, an den Verdünnungsstellen gegen den Kolben zu, wie dies durch die Pfeile angedeutet ist.

Die Entfernung zwischen einem Verdichtungsmaximum und dem folgenden, oder zwischen einem Verdünnungsmaximum und dem folgenden ist eine Wellenlänge.

Wir haben hier der Einfachheit wegen die Fortpflanzung der Luftwellen in einer Röhre betrachtet; ganz in derselben Weise pflanzen sich aber auch die Wellen in freier Luft von den oscillirenden Körpern nach allen Seiten hin fort. Gerade so, wie sich um die Stelle des Wassers, an welcher der Stein hineingefallen ist, kreisförmige Wellen bilden, bilden sich um den oscillirenden Körper kugelförmige Luftwellen.

102 **Verschiedenheit der Schallempfindungen.** Die Eindrücke, welche unser Ohr wahrzunehmen vermag und welche man mit dem gemeinschaftlichen Namen des Schalles bezeichnet, sind von sehr mannigfaltiger Art. Zunächst unterscheiden wir zwischen Geräuschen (Zischen, Knarren, Rasseln u. s. w.) und musikalischen Tönen. Die Empfindung eines Tones wird durch regelmäßige Schwingungen des tönenden Körpers, also durch periodische Bewegungen hervorgebracht, während Geräusche von nicht periodischen Bewegungen herrühren.

Die verschiedenen Töne unterscheiden sich aber von einander:

1) durch ihre Höhe,
2) durch ihre Stärke,
3) durch ihre Klangfarbe.

Die Tonhöhe hängt nur von der Schwingungsdauer des tönenden Körpers ab, oder was dasselbe ist, von der Schwingungszahl desselben, d. h. von der Anzahl der Schwingungen, welche er in einer gegebenen Zeit, etwa in einer Secunde ausführt.

Die Töne sind um so höher, je größer ihre Schwingungszahl oder je kleiner ihre Schwingungsdauer ist.

Welches die Schwingungszahl der verschiedenen Töne ist und wie man dieselbe ermitteln kann, wird weiter unten besprochen werden.

Die Stärke oder die Intensität des Tones hängt von der Schwingungsweite oder Amplitude der Schwingungen ab, welche der tönende Körper macht; je weiter die schwingenden Theilchen sich von ihrer Gleichgewichtslage entfernen, desto stärker ist der Ton.

Unter Klangfarbe oder Klangcharakter versteht man die Eigenthümlichkeiten, durch welche man bei gleicher Tonhöhe und gleicher Stärke die Töne verschiedener Instrumente unterscheiden kann. So hat z. B. der auf dieselbe Note gespielte Ton einen ganz anderen Charakter, je nachdem er von einer Violine, oder von einer Clarinette, oder von einer Trompete herrührt.

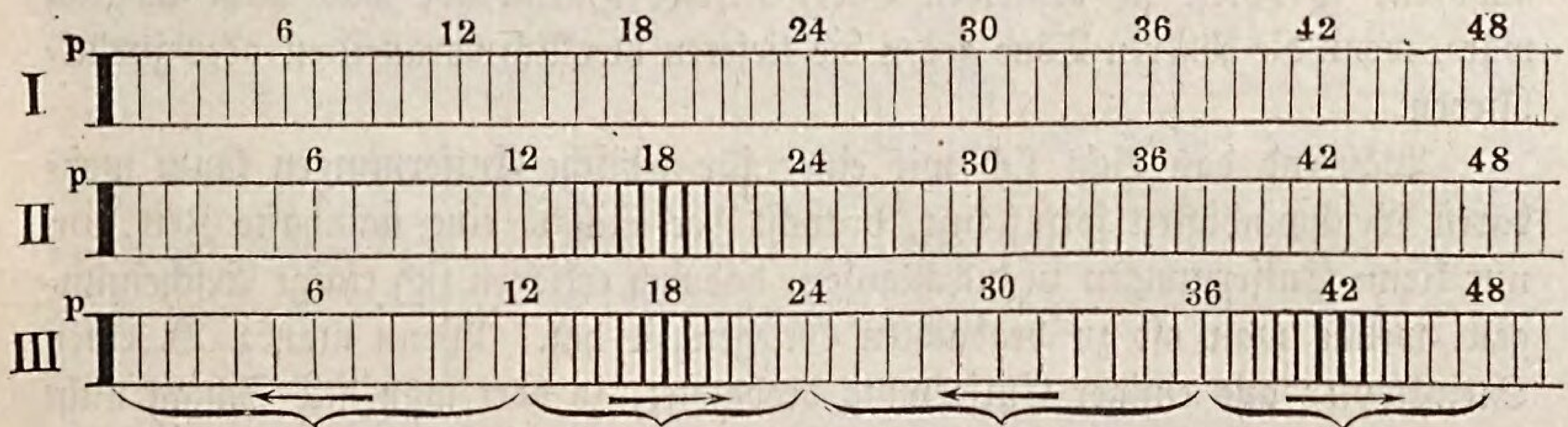
Das Wesen der Klangfarbe ist erst in neuerer Zeit durch die Untersuchungen von Helmholtz (1858) ermittelt worden; wir werden darauf später zurückkommen.

Einfluss der Schwingungsdauer auf die Wellenlänge. 103

Die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Schallwellen in der Luft fortpflanzen, ist, wie bald bewiesen werden wird, unabhängig von der Tonhöhe, also auch in dem oben betrachteten Falle unabhängig von der Schwingungsdauer des Kolbens p.

Nehmen wir nun an, der Kolben p brauche zu einer Schwingung eine doppelt so große Zeit als die, auf welche sich Fig. 205 bezog, so wird auch, wäh-

Fig. 206.



rend der Kolben einmal hin- und hergeht, die Welle doppelt so weit fortschreiten als in jenem Falle. Nach dem ersten Hin- und Hergange des Kolbens p wird die Welle bis zur Schicht 24 fortgeschritten sein (Nro. II Fig. 206) und es befindet sich für diesen Moment ein Dichtigkeitsmaximum bei 18, die größte Verdünnung bei 6. — Nach zweimaligem Hin- und Hergange des Kolbens ist dann die Welle bis 48 fortgeschritten, wie man in Nro. III Fig. 206 sieht.

Man sieht, daß hier (Fig. 206) die Wellenlänge doppelt so groß ist, als für den in Fig. 205 betrachteten Fall. Wenn man diese Schlußweise verallgemeinert, so ergiebt sich leicht, daß die Wellenlänge eines Tones, d. h. der Abstand von einem Dichtigkeitsmaximum in der Schallwelle bis zum folgenden, der Schwingungsdauer des tonerregenden Körpers proportional ist.

Bezeichnen wir mit λ die Wellenlänge eines Tones, mit t die in Secunden ausgedrückte Dauer einer Schwingung des tönenden Körpers, so ist demnach

$$\lambda = nt \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

wenn n ein constanter Factor ist. Bezeichnet z die Anzahl der Schwingungen, welche der tönende Körper in einer Secunde macht, so ist $t \,.\, z = 1$, also $t = \frac{1}{z}$ mithin auch

$$\lambda = \frac{n}{z} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \qquad 2)$$

Die Wellenlänge eines Tones verhält sich also umgekehrt wie die Schwingungszahl desselben, d. h. umgekehrt wie die Anzahl der Schwingungen, welche in 1 Secunde gemacht werden müssen, um diesen Ton zu erzeugen.

Aus Gleichung 2) folgt

$$\lambda \,.\, z = n \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \qquad 3)$$

Da nun λ die Wellenlänge, z aber die Anzahl der Wellenlängen bezeichnet, um welche der Schall in 1 Secunde fortschreitet, so ist also n der Weg, welchen er in 1 Secunde zurücklegt, oder mit anderen Worten, n ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles.

104 **Geschwindigkeit des Schalles.** Alle Töne, welches auch ihre Höhe oder Tiefe, ihre Intensität und ihr Klang sein mag, verbreiten sich in der Luft mit gleicher Geschwindigkeit, denn wenn verschiedene Beobachter in verschiedenen Entfernungen dasselbe Concert anhören, so hören sie denselben Tact, dieselbe Harmonie, was nicht möglich wäre, wenn die höheren Töne gegen die tieferen merklich voraneilten oder zurückblieben.

Während das Licht sich mit einer für irdische Entfernungen kaum meßbaren Geschwindigkeit fortpflanzt, braucht der Schall eine namhafte Zeit, um nur kleine Entfernungen zu durchlaufen; dadurch erklären sich einige Erscheinungen, welche man oft zu beobachten Gelegenheit hat. Wenn man z. B. einen Steinklopfer aus einiger Entfernung beobachtet, so hört man den Schlag nicht in dem Momente, in welchem man den Hammer aufschlagen sieht, sondern erst, wenn er wieder gehoben wird; es macht dies den Eindruck, als ob der Schall nicht durch das Aufschlagen des Hammers, sondern durch das Abreißen von dem Steine hervorgebracht würde. Wenn man ein Regiment Soldaten nach dem Tacte der vorausgetragenen Trommeln marschiren sieht, so beobachtet man eine wellenförmige Bewegung der Colonnen, welche sich von den Trommeln aus durch das ganze Regiment fortpflanzt; es erklärt sich dies daher, daß nicht alle Soldaten gleichzeitig auftreten und den neuen Schritt beginnen, weil sie den Trommelschlag um so später vernehmen, je weiter sie von den Trommeln entfernt sind.

Die Geschwindigkeit des Schalles läßt sich auf eine ganz einfache Weise ermitteln; man beobachtet nur, wie viel Zeit zwischen der Wahrnehmung des Blitzes und des Knalles einer in einer bekannten Entfernung vom Beobachter losgebrannten Kanone vergeht. Am besten läßt sich natürlich eine solche Beobachtung des Nachts machen. Sehr genaue Versuche der Art wurden von mehreren Gelehrten im Jahre 1822 bei Paris ausgeführt. Die Entfernung

zwischen der Kanone und den Beobachtern betrug 18612,5 m; zwischen der Beobachtung des Blitzes und des Knalles vergingen 54,6 Secunden, woraus folgt, daß sich der Schall in gewöhnlicher Luft in einer Secunde um

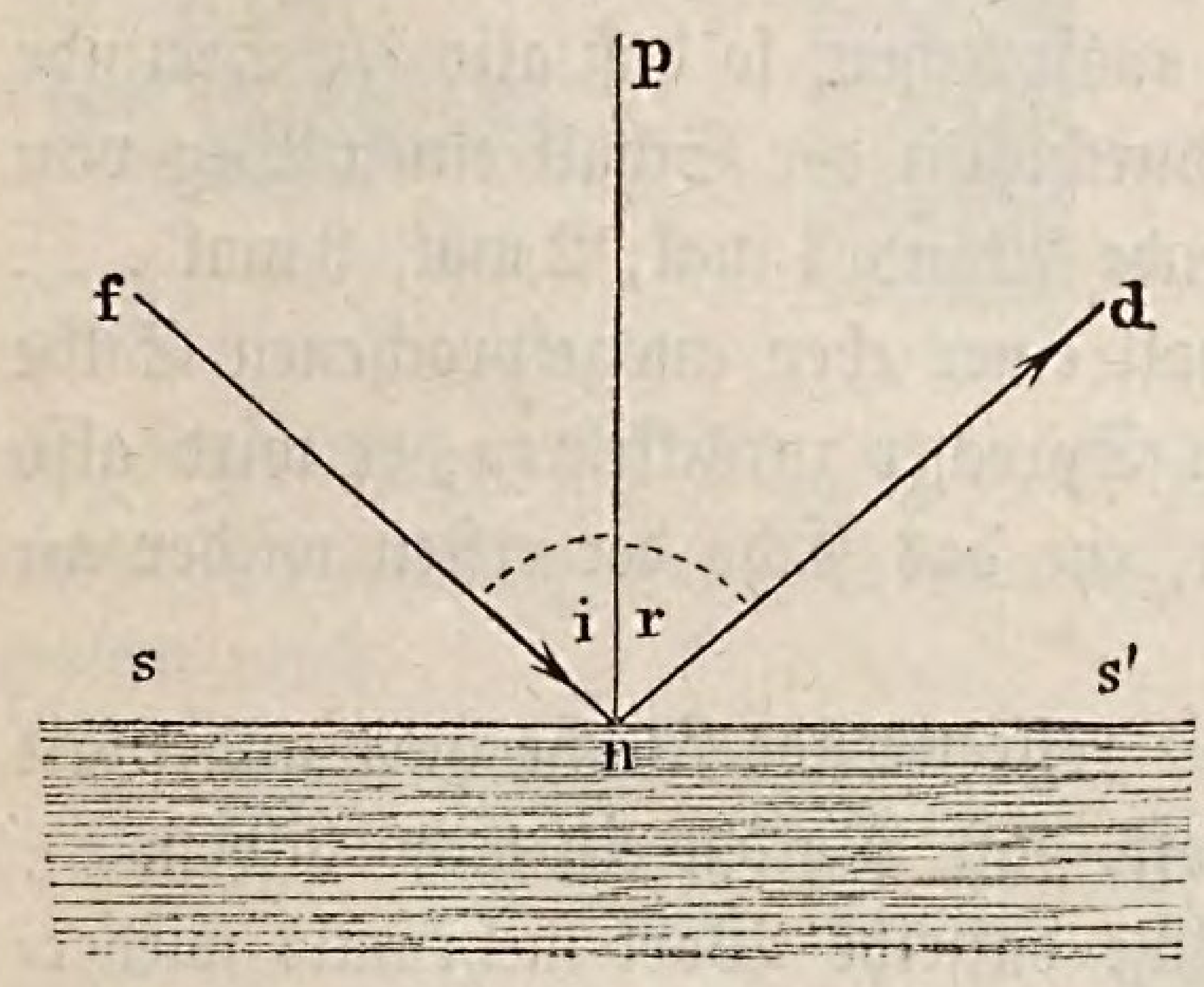
$$n = 18612{,}5 : 54{,}6 = 340{,}89\,\mathrm{m}$$

fortpflanzt, wenn n die im vorigen Paragraphen definirte Bedeutung hat.

In anderen Mitteln ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles nicht dieselbe; in Eisen pflanzt er sich $16^2/_3$, in Wasser $4^1/_4$ mal so schnell fort als in Luft.

Von der Reflexion des Schalles und dem Echo. Wenn die Schallwellen aus einem Mittel in ein anderes übergehen, so erleiden sie immer eine theilweise Reflexion; wenn sie aber auf ein festes Hinderniß stoßen, so werden sie fast vollständig reflectirt. 105

Fig. 207.

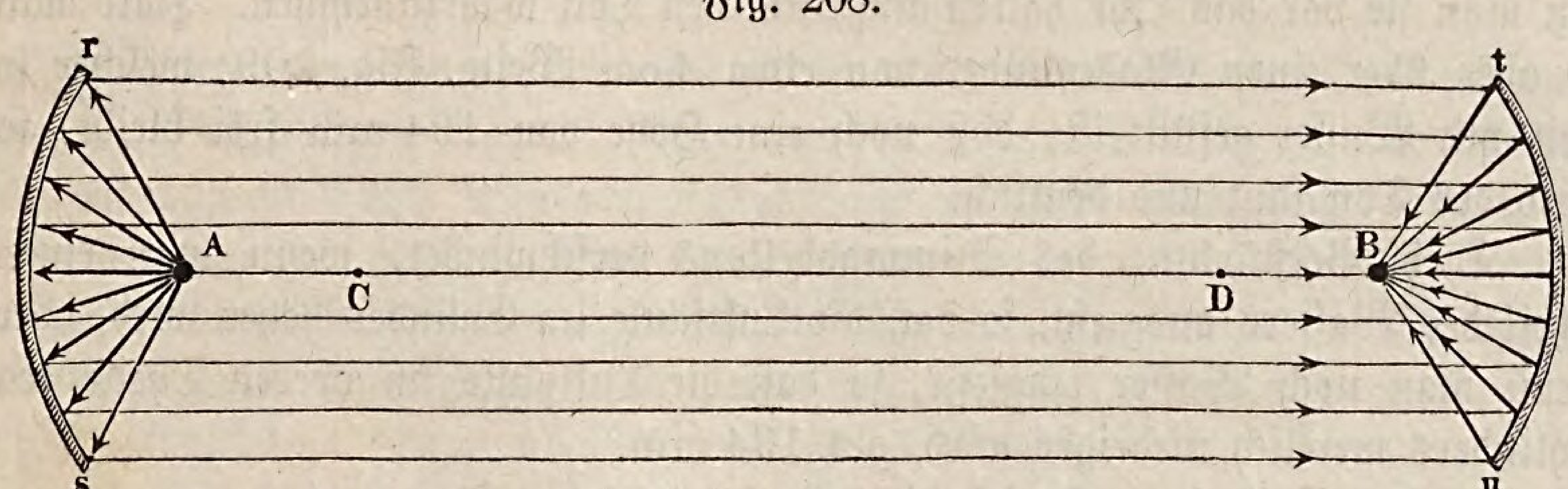


Mag nun die Reflexion partiell oder vollständig sein, so ist doch der Reflexionswinkel stets dem Einfallswinkel gleich. Es sei ss', Fig. 207, die Trennungsfläche der beiden Mittel, etwa Luft und Wasser, und ein Schallstrahl bewege sich in der Richtung fn gegen die Wasserfläche, so wird ein Theil der Bewegung in das Wasser übergehen, ein anderer Theil aber wird sich in der Richtung nd so fortpflanzen, daß dieselbe mit dem Perpendikel np, dem Einfallslothe, einen ebenso großen Winkel macht wie fn, d. h. der Reflexionswinkel dnp ist dem Einfallswinkel fnp gleich.

Dasselbe Gesetz gilt auch für die Reflexion der Lichtstrahlen.

Daß die Schallstrahlen wirklich denselben Reflexionsgesetzen folgen, wie die Lichtstrahlen, ergiebt sich auch durch Versuche mit parabolischen oder sphärischen Hohlspiegeln. In Fig. 208 seien rs und tu zwei sphärische Hohlspiegel,

Fig. 208.



welche in einer Entfernung von etwa 5 m von einander so aufgestellt sind, daß die Axen derselben in eine gerade Linie zusammenfallen. Bringt man nun in den Brennpunkt A des einen Hohlspiegels eine Taschenuhr, so hört ein im

Brennpunkte B des anderen Spiegels befindliches Ohr deutlich das Ticken derselben, denn alle von A ausgehenden Schallstrahlen, welche den Hohlspiegel rs treffen, werden parallel mit der Axe reflectirt, wie es in unserer Figur angedeutet ist; auf den zweiten Spiegel tu treffend, werden sie aber gegen den Brennpunkt B desselben zurückgeworfen und also in diesem wieder vereinigt.

Entfernt man das Ohr aus dem Brennpunkte B, so verschwindet der Schall, selbst wenn man sich dem Punkte A bedeutend nähert.

Aus der Reflexion des Schalles erklärt sich auch die Erscheinung des Echos.

Wenn die Schallwellen rechtwinklig auf die reflectirende Fläche treffen, so sendet das Echo den Ton zu seinem Ausgangspunkte zurück und es kann je nach der Entfernung der reflectirenden Wand eine kleinere oder größere Anzahl von Silben unter Bedingungen wiederholen, welche leicht zu ermitteln sind. In einer Secunde kann man bequem 3 Silben aussprechen, so daß also $^1/_3$ Secunde auf eine Silbe kommt. In $^1/_3$ Secunde durchläuft der Schall einen Weg von ungefähr 112 m; wenn also die reflectirende Wand 1 mal, 2 mal, 3 mal . . . n mal 56 m entfernt ist, so wird der Schall einer eben ausgesprochenen Silbe nach $^1/_3$, $^2/_3$, $^3/_3$ . . . $n/_3$ Secunden zum Sprecher zurückkehren; er wird also 1, 2, 3 . . . n Silben aussprechen können, ehe das Echo der ersten wieder an sein Ohr schlägt.

Es ist nicht durchaus nöthig, daß die reflectirende Fläche hart und platt sei, denn man beobachtet auf dem Meere oft, daß Wolken ein Echo bilden.

Vielfache Echos, d. h. solche, welche dasselbe Wort mehrmals wiederholen, entstehen, wenn entweder mehrere in verschiedenen Entfernungen befindliche Wände den Schall zu seinem Entstehungsorte zurückwerfen, oder auch wenn die Schallwellen zwischen zwei parallelen Wänden hin- und wieder zurückgeworfen werden.

Durch die Reflexion des Schalles erklären sich auch die Wirkungen des Sprachrohres und des Hörrohres.

106 **Stehende Luftwellen.** Wenn man eine gewöhnliche Stimmgabel (welche den Ton a_1 giebt) an ihrem Stiele haltend anschlägt, so tönt sie so schwach, daß man sie vor das Ohr halten muß, um den Ton wahrzunehmen. Hält man sie aber über einen Glascylinder von etwa 4 cm Weite, Fig. 209, welcher so weit mit Wasser gefüllt ist, daß noch eine Höhe von 194 mm frei bleibt, so wird der Ton laut und deutlich.

Diese Verstärkung des Stimmgabeltons verschwindet, wenn man einen Theil des Wassers ausgießt, so daß die Luftsäule im Cylinder höher wird, oder wenn man noch Wasser eingießt, so daß die Luftsäule im oberen Theile des Cylinders merklich niedriger wird, als 194 mm.

Noch auffallender läßt sich diese Verstärkung des Tones zeigen, wenn man eine durch Streichen mit dem Violinbogen zum Tönen gebrachte Glasglocke über eine etwa 15 cm weite, unten geschlossene Pappröhre hält, Fig. 210, welche eine der Höhe des Tones entsprechende Länge hat. Um diese Länge nach Bedürfniß

reguliren zu können, besteht die Röhre aus zwei Theilen, von welchen der untere *A* unten geschlossen ist, während der obere, etwas weitere Theil *B*, nach Belieben auf- und abgeschoben werden kann.

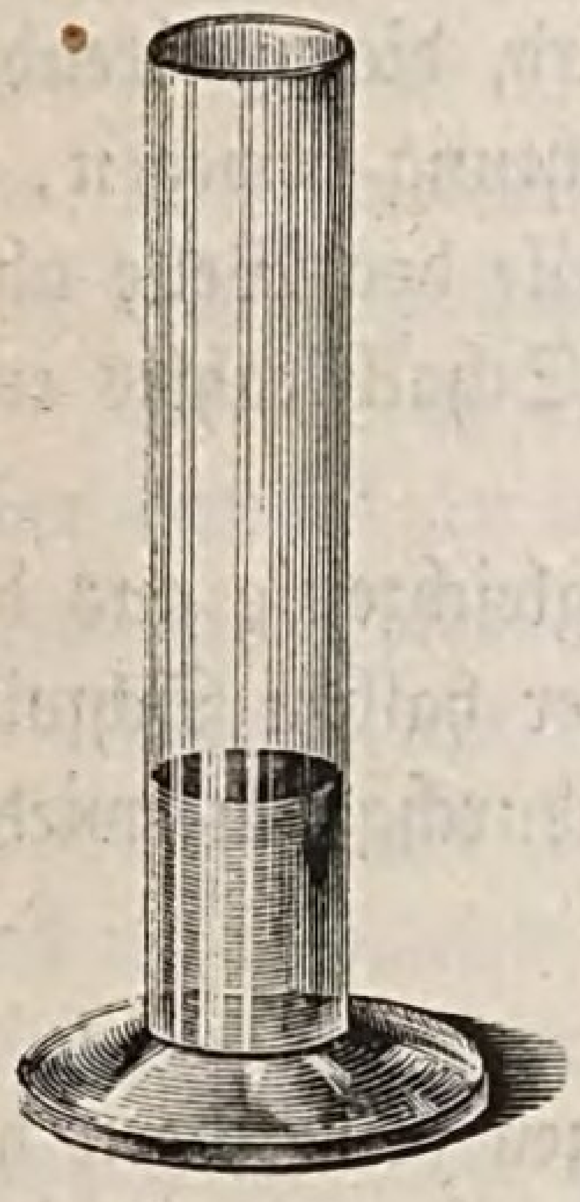


Fig. 209.

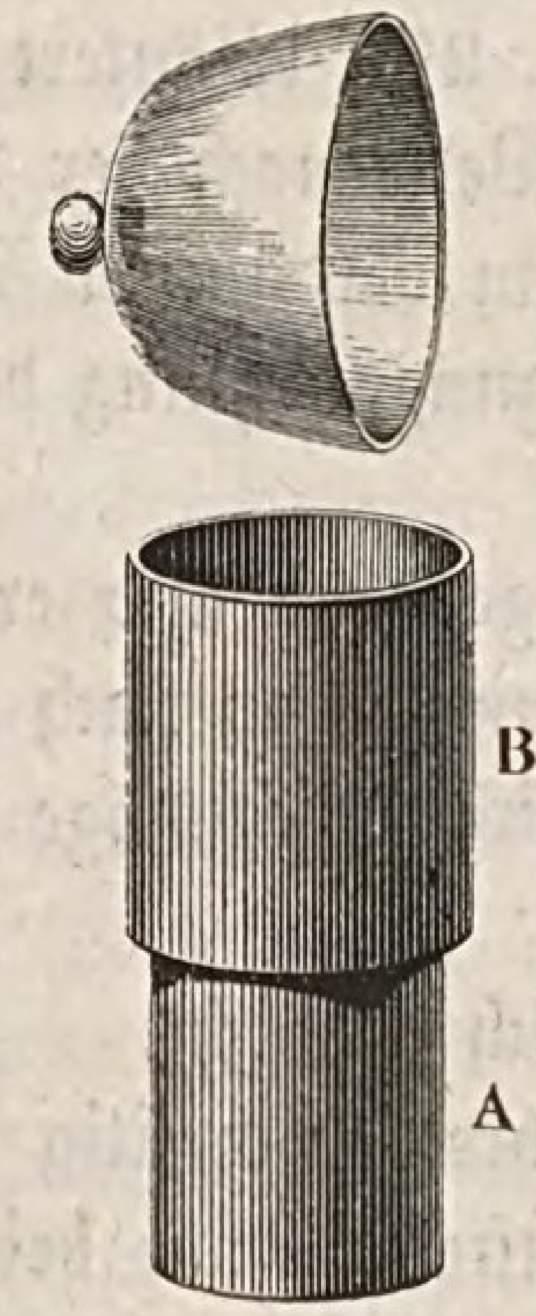


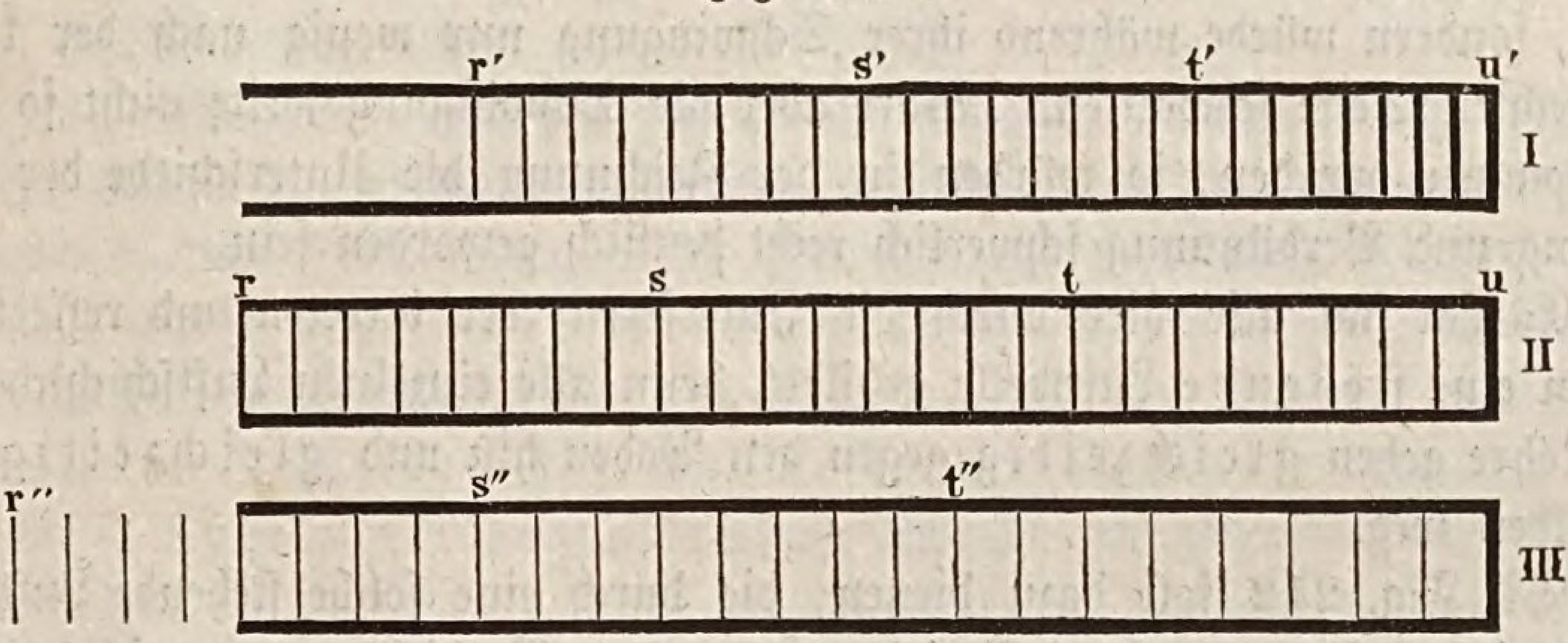
Fig. 210.

Diese Verstärkung des Tones rührt daher, daß die Luftsäule in dem Rohre selbst in den Zustand *stehender Schwingungen* versetzt und dadurch *selbsttönend* wird.

Wenn eine Schallwelle in eine auf der einen Seite offene, auf der anderen Seite geschlossene Röhre eindringt, so wird sie alsbald an dem Boden der Röhre reflectirt; die reflectirten Wellen begegnen aber den neu eintretenden, und durch das Zusammenwirken oder die Interferenz beider Wellensysteme bilden sich *stehende Luftwellen*, wenn die Länge der Röhre $^1/_4$ oder $^3/_4$ oder $^5/_4$ von der Wellenlänge des einfallenden Tones ist, wie sich dies aus den weiteren Entwickelungen dieses Paragraphen ergeben wird.

Nehmen wir an, die Länge der in Fig. 211 dargestellten Röhre (also *ru* bei II) sei $^1/_4$ von der Länge der einfallenden Schallwellen, so ist der Weg von

Fig. 211.



der Oeffnung zum Boden und dann wieder vom Boden bis zur Oeffnung gerade $^1/_2$ Wellenlänge; die einfallende und die reflectirte Welle, welche sich an der Oeffnung der Röhre begegnen, weichen also in ihrem Gange um $^1/_2$ Wellenlänge von einander ab; es trifft demnach hier mit einem Dichtigkeitsmaximum der einfallenden Welle das Maximum der Verdünnung der reflectirten Welle zusammen, und umgekehrt; somit findet *an der Oeffnung der Röhre weder Verdichtung noch Verdünnung* Statt.

Betrachten wir aber nun den *Bewegungszustand* der einzelnen Luftschichten.

In dem Augenblick, in welchem gerade das Maximum der Verdichtung in die Oeffnung der Röhre eintritt, tritt das Maximum der Verdünnung aus; in

diesem Zeitpunkt findet auch am Boden der Röhre weder Verdünnung noch Verdichtung Statt, alle Theilchen sind in ihrer Gleichgewichtslage. Durch die eintretende Verdichtungswelle aber sind alle Theilchen gegen den Boden hingetrieben, durch die reflectirte Verdünnungswelle werden sie nach derselben Seite bewegt, da sich, wie durch Nr. III in Fig. 206 erläutert wird, die vibrirenden Luftschichten im verdichteten Theile der Welle nach der Richtung bewegen, in welcher der Schallstrahl fortschreitet, in dem verdünnten Theile der Welle aber in einer Richtung, welche der Fortpflanzungsrichtung des Schallstrahles entgegengesetzt ist.

Alle Luftschichten in der Röhre bewegen sich also erst gleichzeitig aus der Gleichgewichtslage gegen den Boden hin, und dann nach einer halben Schwingungsdauer, wo sie wieder durch die Gleichgewichtslage hindurchgehen, wieder gleichzeitig vom Boden weg.

Es ist dies durch Fig. 211 anschaulich gemacht.

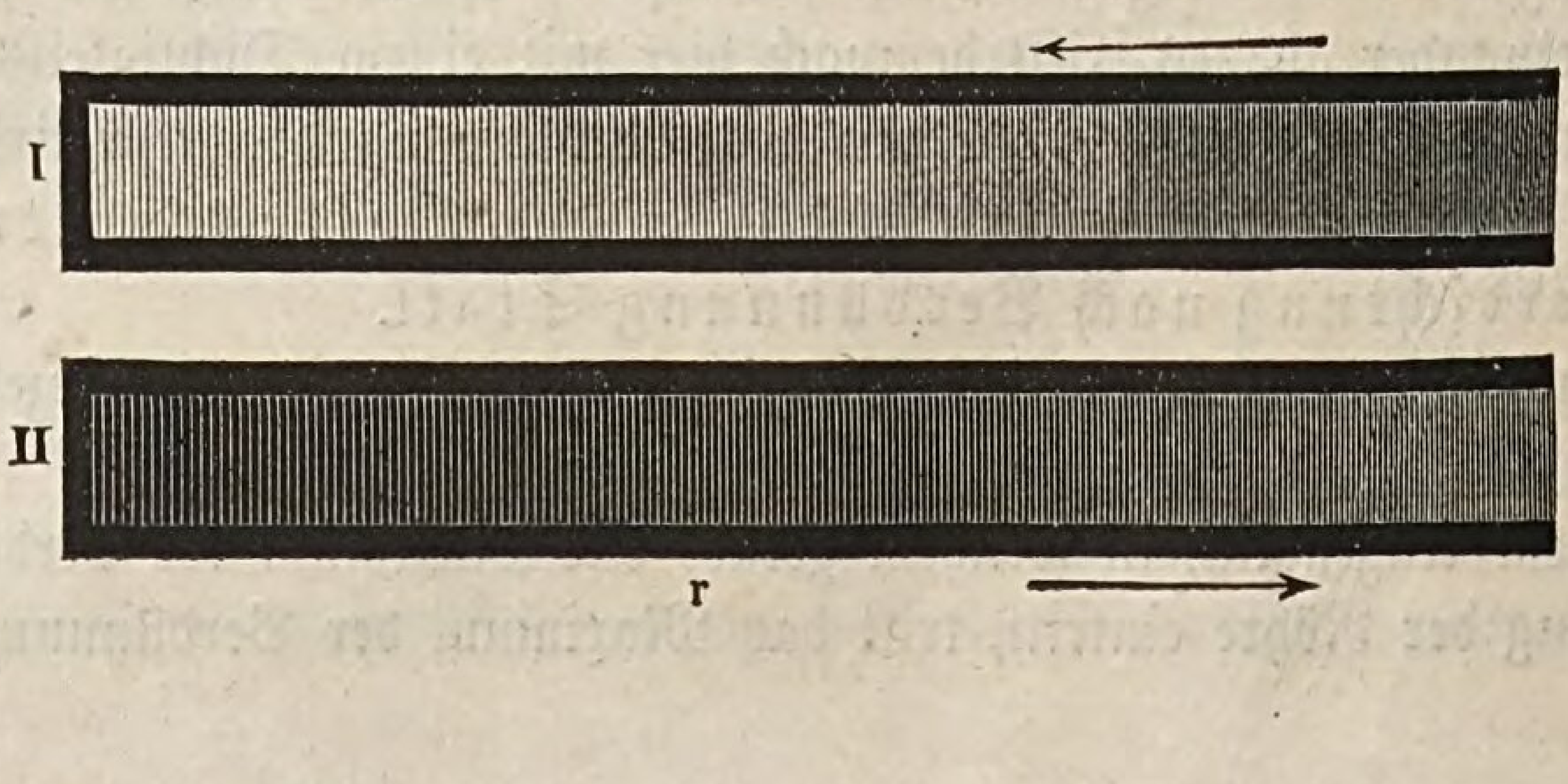
Wenn alle Luftschichten in der Röhre gleichzeitig gegen den Boden hin gehen, so muß hier eine Verdichtung entstehen, wie bei Nr. I; wenn sie von der Gleichgewichtslage aus von dem Boden sich wegbegeben, so muß an demselben eine Verdünnung stattfinden, wie bei Nr. III.

Unsere Zeichnung ist, um den Hergang sichtbar zu machen, hinsichtlich der Schwingungsweite ungeheuer übertrieben, d. h. bei einer Röhre von der Länge, wie sie in unserer Zeichnung dargestellt ist, würde in dem besprochenen Falle die Luftschicht, welche in ihrer Gleichgewichtslage an der Oeffnung der Röhre liegt, lange nicht so weit in die Röhre ein- und aus ihr heraustreten, sondern würde während ihrer Schwingung nur wenig nach der linken und rechten Seite schwanken. Wäre aber die Schwingungsweite nicht so groß angenommen worden, so würden in der Zeichnung die Unterschiede der Verdichtung und Verdünnung schwerlich recht deutlich geworden sein.

Es hat sich also hier durch die Interferenz der directen und reflectirten Wellen eine **stehende** Luftwelle gebildet, denn alle einzelnen Luftschichtchen in der Röhre gehen **gleichzeitig** gegen den Boden hin und **gleichzeitig** von demselben weg.

Die Fig. 212 soll dazu dienen, die durch eine solche stehende Luftwelle abwechselnd hervorgebrachten Verdünnungen und Verdichtungen anschaulich zu machen. Sind die Theilchen in ihrer Oscillation gegen das verschlossene Ende

Fig. 212.



der Röhre hin an den äußersten Punkten ihrer Bahn angekommen, so findet hier eine Verdichtung Statt, wie bei Nr. II.

Nun beginnen die einzelnen Luftschichten sich von dem verschlossenen Ende zu entfernen und nach $1/2$ Schwingungsdauer haben wir hier eine Verdünnung, wie bei I. Am offenen Ende der Röhre findet in keinem Zeitmomente eine merkliche Verdichtung oder Verdünnung Statt; hier aber bewegen sich die Luftschichten zwischen den weitesten Gränzen hin und her.

Die Pfeile in I und II, Fig. 212, deuten an, in welcher Richtung die Theilchen sich zu bewegen beginnen, wenn am Boden eben das Maximum der Verdünnung oder der Verdichtung stattfindet.

Würde nun in die Röhre, etwa bei *r*, ein Loch gemacht, so würde dadurch die Bildung der stehenden Welle gestört, wenn nicht ganz verhindert werden, weil im Momente der Verdichtung hier Luft entweichen, im Momente der Verdünnung aber Luft einströmen würde. Der störende Einfluß einer solchen Oeffnung würde aber an solchen Stellen, welche dem offenen Ende näher liegen, geringer sein, weil hier die Verdünnung sowohl als die Verdichtung geringer ist.

Denselben störenden Einfluß, den eine Oeffnung hervorbringt, würde auch in erhöhtem Grade ein Abschneiden der Röhre an diesen Stellen zur Folge haben.

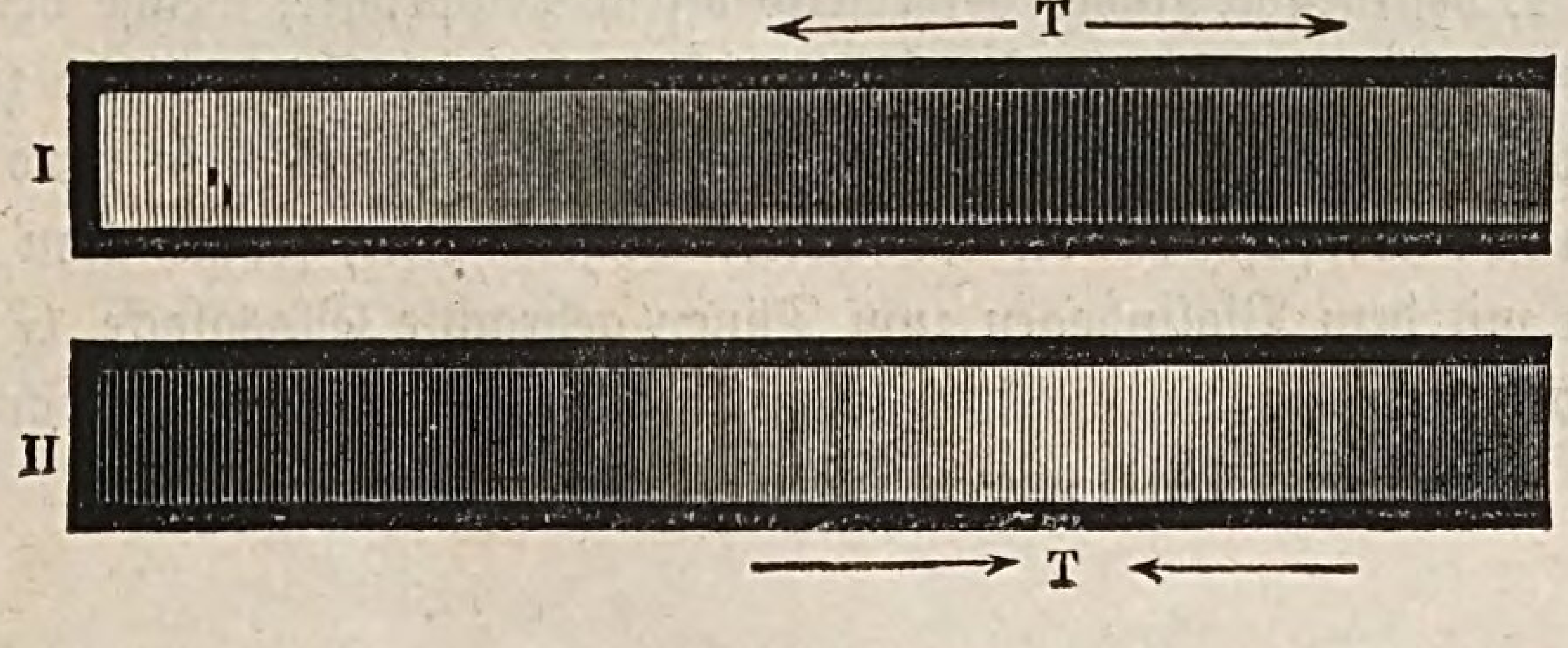
Die Bildung stehender Luftwellen in der Röhre ist also an bestimmte Verhältnisse zwischen der Länge der Röhre und der Wellenlänge des einfallenden Tones gebunden. In dem bisher betrachteten Falle war die Länge der Röhre $1/4$ von der Wellenlänge des einfallenden Tones; es können sich aber auch noch bei anderen Verhältnissen zwischen Röhren- und Wellenlänge stehende Luftwellen in der Röhre bilden.

Zur Bildung der stehenden Welle in der Röhre ist erforderlich, daß dicht bei dem Boden die Schwingungsweiten verschwindend klein werden, daß aber hier abwechselnde Verdünnungen und Verdichtungen stattfinden, während am offenen Ende der Röhre keine merkliche Verdichtung und Verdünnung stattfindet; an der Oeffnung der Röhre muß also stets der verdichtete Theil der reflectirten Welle mit dem verdünnten Theile der einfallenden Welle zusammenfallen, und umgekehrt.

Dieser Bedingung wird auch genügt, wenn die Länge der Röhre $3/4$ von der Länge der einfallenden Schallwellen beträgt, wie Fig. 213, I und II, anschaulich machen soll.

In I (Fig. 213) sehen wir ein Maximum der Verdichtung bei *T*, ein

Fig. 213.



Maximum der Verdünnung am Boden der Röhre; alle links von T liegenden Luftschichten beginnen gleichzeitig ihre Bewegung nach der Linken, während die rechts von T gelegenen Luftschichten nach der Rechten hin sich zu bewegen beginnen.

Nach $\frac{1}{4}$ Schwingungsdauer haben die einzelnen Schichten eine solche Stellung erreicht, daß in der ganzen Röhre die Luft eine gleichförmige Dichtigkeit hat. Bei fortgesetzter Bewegung in der angegebenen Richtung wird abermals nach $\frac{1}{4}$ Schwingungsdauer der in II (Fig. 213) dargestellte Zustand eintreten, so daß dann am Boden die größte Verdichtung, bei T die größte Verdünnung ist.

Von diesem Zeitpunkte an beginnen die einzelnen Luftschichten wieder von beiden Seiten her sich gegen T hin zu bewegen, und so tritt dann nach $\frac{1}{2}$ Schwingungsdauer wieder der Zustand I (Fig. 213) ein.

Die Luftschichten, welche rechts und links von T liegen, bewegen sich entweder gleichzeitig von T weg, oder gleichzeitig nach T hin, während T keine Bewegung hat; von der Luftschicht T sagt man deshalb auch: sie bildet einen Schwingungsknoten.

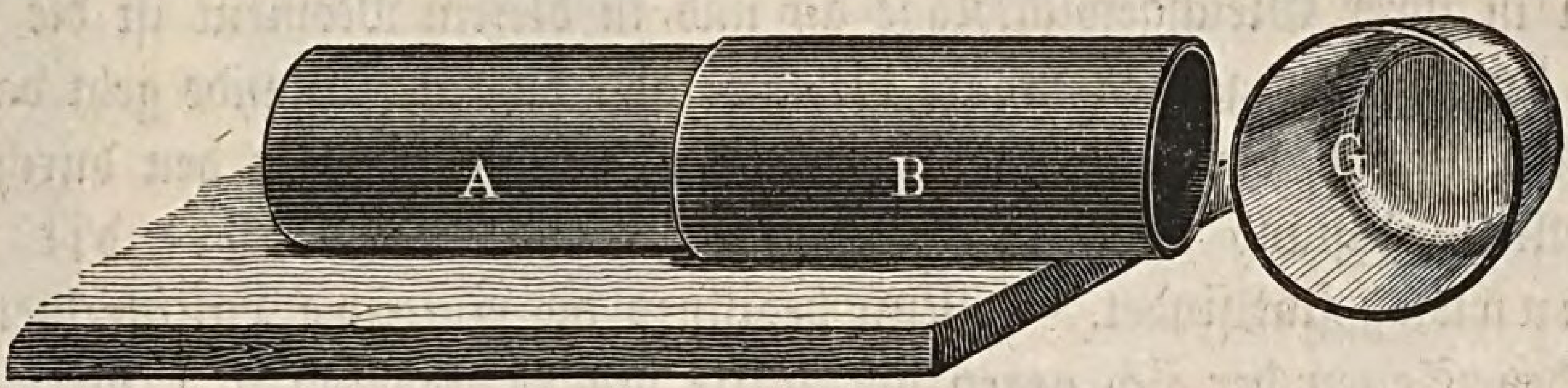
Die Stellen, wo weder Verdünnung noch Verdichtung stattfindet, während die Luftschichten gerade hier mit der größten Amplitude schwingen, also die Stelle der Röhrenöffnung und die Mitte zwischen T und dem Boden heißen Bäuche oder Maxima. Jedes der beiden Maxima ist von dem dazwischen gelegenen Schwingungsknoten eine Viertelswellenlänge entfernt. Die stehende Wellenbewegung der Luft in einer gedeckten Röhre geht überhaupt so vor sich, daß von dem offenen Ende an gerechnet Maxima mit Knoten wechseln und am geschlossenen Ende ein Knoten den Schluß bildet. Dieser Bedingung wird entsprochen, wenn die Länge der Röhre ein ungerades Vielfaches von Viertelswellenlängen beträgt, wenn sie also $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{4}$, $\frac{7}{4}$ ... Wellenlängen mißt.

107 **Offene Röhren.** Bisher haben wir nur die Bildung stehender Luftwellen in solchen Röhren betrachtet, welche durch einen Boden geschlossen waren, und welche deshalb auch gedeckte Röhren oder gedeckte Pfeifen genannt werden. In gleicher Weise läßt sich aber auch die Luftsäule, welche in beiderseits offenen Röhren eingeschlossen ist, in den Zustand stehender Schwingungen versetzen.

Man lege eine gleichfalls aus zwei in einander schiebbaren Stücken A und B, Fig. 214, bestehende, jedoch beiderseits offene Pappröhre, welche bei gleichem Durchmesser gerade doppelt so lang ist, wie diejenige, welche zu dem in Fig. 210 dargestellten Versuch gedient hat, auf einen Tisch, so wird man ein bedeutendes Anschwellen des Tones wahrnehmen, sobald man die durch Anstreichen mit dem Violinbogen zum Tönen gebrachte Glasglocke G (dieselbe, welche zu dem auf S. 203 beschriebenen Versuch gedient hat) so vor die eine Mündung des Rohres hält, wie es unsere Figur andeutet.

Bezeichnen wir mit l die Länge der gedeckten Röhre, welche für den tiefsten Ton der Glocke G anspricht, so muß man also einer beiderseits offenen

Fig. 214.



Röhre die Länge $2\,l$ geben, wenn die in derselben eingeschlossene Luftsäule durch denselben Ton zum Mittönen gebracht werden soll. Die Wellenlänge des tiefsten Tones, für welchen eine beiderseits offene Röhre anspricht, ist also doppelt so groß wie die Länge der Röhre.

Die Bildung stehender Wellen in solchen Röhren erklärt sich folgendermaßen:

Wenn der verdichtete Theil einer Welle, nachdem er die Röhre ihrer ganzen Länge nach durchlaufen hat, an der zweiten Oeffnung austritt, so werden die zusammengepreßten Lufttheilchen leicht nach allen Seiten hin ausweichen, und dadurch wird eine Verdünnung entstehen, welche nun, gleichsam an der Austrittsöffnung der Röhre wieder eintretend, dieselbe in entgegengesetzter Richtung durchläuft wie die ursprünglich einfallenden Schallwellen.

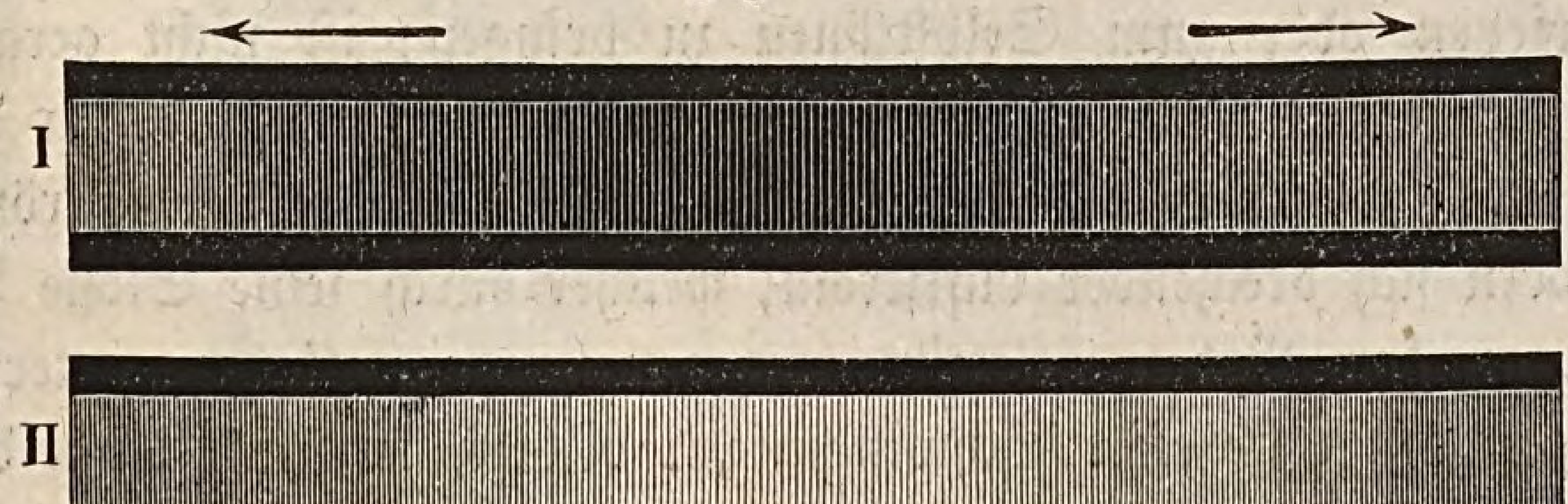
In gleicher Weise wird eine aus der Röhre austretende Verdünnungswelle durch das seitliche Zuströmen von Luft in eine rückwärts laufende Verdichtungswelle verwandelt.

Die rückwärts laufenden Wellen sind freilich weniger intensiv als die ursprünglichen.

Diese, die Röhre rückwärts durchlaufenden Wellen kommen nun mit den neu einfallenden zur Interferenz und so kommen unter entsprechenden Umständen stehende Luftwellen in der Röhre zu Stande, deren Bildung sich nach den im vorigen Paragraphen besprochenen Grundsätzen ableiten läßt.

Der tiefste Ton, für welchen die Röhre anspricht, ist derjenige, dessen Wellenlänge doppelt so groß ist als die Länge der Röhre. Für diesen Fall

Fig. 215.

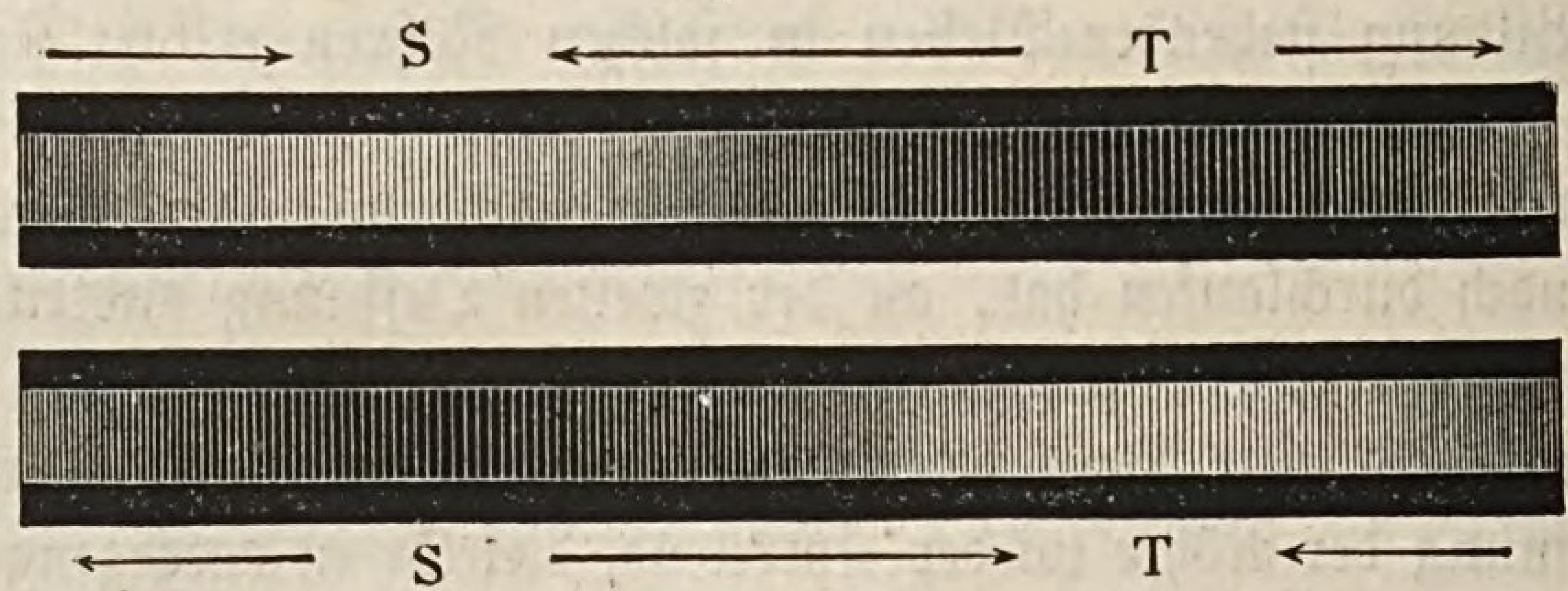


bildet sich ein Schwingungsknoten in der Mitte der Röhre, ein Maximum aber an jedem Ende, wie es durch Fig. 215 anschaulich gemacht ist. I stellt den Zeitpunkt dar, wo in der Mitte der Röhre die größte Verdichtung

stattfindet; während die Luftschicht in der Mitte der Röhre in Ruhe bleibt, beginnt die Luft auf beiden Seiten sich von der Mitte zu entfernen, wie dies durch die Pfeile angedeutet ist; nach $\frac{1}{4}$ Schwingungsdauer kommen alle Luftschichten in ihrer Gleichgewichtslage an und in diesem Moment ist die Dichtigkeit der Luft in der ganzen Röhre dieselbe; aus diesem Zustande geht dann aber die Luft während der nächsten Viertelsschwingungsdauer in den durch Nr. II dargestellten Zustand über, wo in der Mitte der Röhre die größte Verdünnung stattfindet. — Nun beginnen die einzelnen Luftschichten wieder von beiden Seiten her sich gegen die Mitte hin zu bewegen u. s. w.

Für den nächst höheren Ton, welcher die Luftsäule in der offenen Röhre in den Zustand stehender Schwingungen versetzt, bildet sich ein Maximum in der Mitte, Knoten aber bilden sich in den Punkten *S* und *T*, Fig. 216, welche

Fig. 216.



um $\frac{1}{4}$ der Röhrenlänge von den Enden abstehen. Wenn in *T* ein Maximum der Verdichtung stattfindet wie in Nr. I, so findet in *S* Verdünnung Statt, und umgekehrt, wie in Nr. II.

Für den zuletzt besprochenen Fall ist die Wellenlänge des Tones der Länge der Röhre gleich; die Schwingungsdauer dieses Tones ist daher auch nur halb so groß als die des Grundtones der Röhre. Die stehende Wellenbewegung der Luft in einer offenen Röhre geht überhaupt so vor sich, daß von dem einen Ende an gerechnet Maxima mit Knoten wechseln und am anderen Ende ein Maximum den Schluß bildet. Dieser Bedingung wird entsprochen, wenn die Länge der Röhre ein ganzes Vielfaches von halben Wellenlängen beträgt, wenn sie also $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{2}$, $\frac{5}{2}$ ... Wellenlängen mißt.

108 **Orgelpfeifen.** Um die Luft in einer Röhre in stehende Schwingungen zu versetzen oder zum Selbsttönen zu bringen, ist nicht gerade nöthig, einen tönenden Körper vor die Oeffnung zu halten, wie dies ja die Orgelpfeifen zeigen. Hier ist es ein am offenen Ende der Röhre vorbeiströmender an ihren Rändern sich brechender Luftstrom, welcher durch seine Stöße Wellen erzeugt, die, an dem Boden reflectirt, mit den neu einfallenden interferiren, so daß sich regelmäßige stehende Schwingungen bilden, wodurch dann die Luft in der Röhre selbsttönend wird.

Die einfachste Art, die Luft in einer kleineren Röhre zum Tönen zu bringen, ist die, daß man sie in verticaler Richtung vor den Mund hält, das geschlossene Ende nach unten gekehrt, während das offene Ende an die Unterlippe gehalten wird, und dann schräg gegen den Rand der Röhre bläst.

Fig. 217.

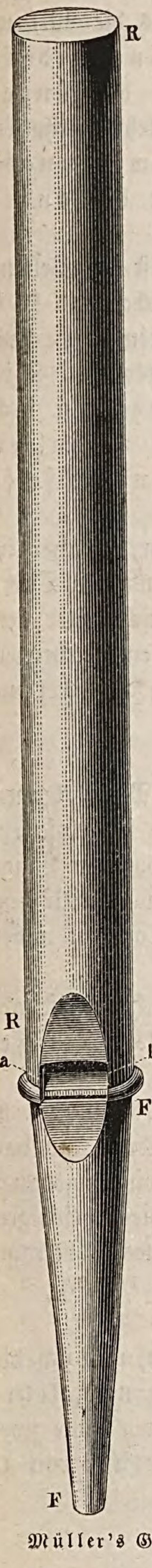
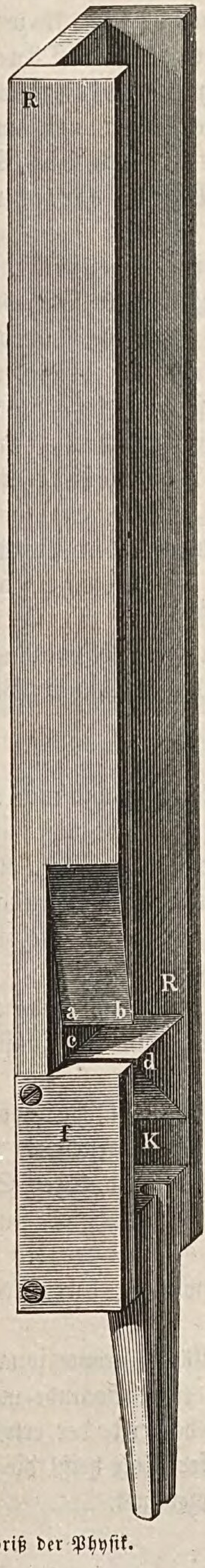


Fig. 218.



Die Töne sind natürlich um so höher, je kürzer die Pfeife ist.

Die zweckmäßigste Methode, die Luft in Röhren in den Zustand stehender Schwingungen zu versetzen, ist diejenige, welche man bei **Orgelpfeifen** in Anwendung gebracht hat. Die Einrichtung derselben ist aus den Figuren 217 und 218 zu ersehen. Man unterscheidet an ihnen den **Fuß**, den **Mund** und die **Röhre**, welche entweder **offen**, oder **gedeckt** sein kann.

In Fig. 217, welche eine Zinnpfeife darstellt, ist der Fuß mit *FF*, die Röhre mit *RR* bezeichnet. Die Röhre hat an ihrem unteren Ende vorn eine Oeffnung *ab*, welche der **Mund** genannt wird; Fuß und Röhre sind durch eine dünne Zinnplatte getrennt; zwischen der vorderen Kante dieser Platte, welche den Boden der Schallröhre bildet, und der vorderen Wand des Fußes bleibt eine schmale Spalte, durch welche die unten in den Fuß eingeblasene Luft austritt und, indem sie sich an der oberen Kante des Mundes bricht, die Luftsäule in der Röhre *RR* in stehende Schwingungen versetzt.

Die Einrichtung der hölzernen Orgelpfeifen ist aus dem Durchschnitt Fig. 218 zu ersehen. Die in den Fuß eingeblasene Luft dringt aus dem Behälter *K* durch einen schmalen Spalt *cd* hervor, und bricht sich an der oberen Kante *ab* des Mundes, von welchem unsere Figur nur die linke Hälfte *abcd* zeigt.

Eine und dieselbe Pfeife kann mehrere Töne geben. Der tiefste Ton, welchen eine Röhre geben kann, ist der **Grundton** derselben; die höheren Töne, welche sie in der Regel nur bei verstärktem Winde giebt, werden als **Obertöne** bezeichnet.

Bezeichnen wir mit *l* die Länge einer **gedeckten Pfeife**, so ist die Wellen-

länge ihres Grundtones $4\,l$; die Wellenlängen ihrer Obertöne sind aber $^4/_3\,l$, $^4/_5\,l$, $^4/_7\,l$ u. s. w., also 3 mal, 5 mal, 7 mal u. s. w. kürzer als die Wellenlänge des Grundtones. Die Wellenlängen der Töne einer gedeckten Pfeife verhalten sich demnach umgekehrt wie die ungeraden Zahlen. Da sich aber die Wellenlängen auch umgekehrt verhalten wie die Schwingungszahlen, so verhalten sich die Schwingungszahlen der Töne einer gedeckten Pfeife direct wie die ungeraden Zahlen.

Wenn l die Länge einer offenen Pfeife bezeichnet, so ist die Wellenlänge ihres Grundtones $2\,l$, die Wellenlängen ihrer Obertöne aber sind $^2/_2\,l$, $^2/_3\,l$, $^2/_4\,l$ u. s. w. Die Wellenlängen der Obertöne einer offenen Pfeife sind also 2 mal, 3 mal, 4 mal u. s. w. kürzer als die ihres Grundtones. Die Wellenlängen der Töne einer offenen Pfeife verhalten sich demnach umgekehrt wie die ganzen Zahlen; somit verhalten sich die Schwingungszahlen der Töne einer offenen Pfeife direct wie die ganzen Zahlen.

Verhältnißmäßig weite Röhren geben nur den Grundton, welcher in engeren Röhren bei stärkerem Winde (beim Ueberblasen) in die nächsten Obertöne überspringt. Sehr enge und lange Röhren, wie sie freilich unter den Orgelpfeifen nicht vorkommen, geben den der Röhrenlänge entsprechenden Grundton gar nicht, sondern lassen schon bei schwachem Winde die Obertöne hören.

109 **Die musikalischen Töne.** Nachdem wir nun ein Mittel kennen gelernt haben, reine Töne hervorzubringen, nämlich durch Orgelpfeifen, und wir gesehen haben, wie die Höhe und Tiefe dieser Töne von der Länge der Pfeifen abhängt, und daß man also durch Verlängerung und Verkürzung der Röhren die Pfeifen beliebig stimmen kann: wollen wir die Tonreihe näher betrachten, welche in der Musik zur Anwendung kommt.

Gehen wir von dem Tone aus, den eine 1,32 m lange gedeckte Pfeife als Grundton giebt! Es ist dies ein Ton, welcher in der Musik als das (große) *C* bezeichnet wird.

Fragen wir nach denjenigen Tönen, die mit *C* harmonisch sind, d. h. nach denjenigen, welche mit *C* zusammen einen angenehmen Eindruck auf das Ohr hervorbringen, so finden wir, daß es solche sind, deren Schwingungsdauer in einem einfachen Verhältniß zu der von *C* steht; es sind dies diejenigen Töne, deren Wellenlänge $^1/_2$, $^2/_3$, $^3/_4$, $^4/_5$, $^5/_6$ von der des Tones *C* beträgt, die also durch solche Pfeifen hervorgebracht werden, deren Länge $^1/_2$, $^2/_3$, $^3/_4$, $^4/_5$, $^5/_6$ von der Länge der Pfeife *C* ist.

Da die Schwingungsdauer der Wellenlänge proportional ist, und sich die Zahl der Schwingungen, welche ein Ton in einer Secunde macht, umgekehrt verhält wie seine Wellenlänge, so macht also der erste der erwähnten Töne zwei Schwingungen, während C eine macht; dieser Ton heißt die Octave von *C* und wird in der Musik als das (kleine) *c* bezeichnet.

Der Ton, dessen Wellenlänge $^2/_3$ von der des Tones *C* beträgt, macht drei Schwingungen, während *C* deren zwei macht; dieser Ton ist die Quinte von *C* und wird mit *G* bezeichnet.

Der Ton, dessen Wellenlänge $^3/_4$ von der des Tones *C* ist, macht vier Schwingungen, während *C* deren drei macht; er wird die Quarte von *C* genannt und mit *F* bezeichnet.

Der Ton, dessen Wellenlänge $^4/_5$ von der des Tones *C* ist, macht fünf Schwingungen, während *C* deren vier macht; er ist die große Terz von *C* und wird mit *E* bezeichnet.

Der zuletzt erwähnte Ton, dessen Wellenlänge $^5/_6$ mal so groß ist, als die von *C*, macht sechs Schwingungen, während *C* deren fünf vollendet; es ist dies die kleine Terz von *C*, die mit *Es* bezeichnet wird.

Ebenso wie *C* seine Octave, Quinte, Quarte, große und kleine Terz hat, so giebt es auch eine Octave, Quinte, Quarte, große und kleine Terz von *c*.

Der Grundton *C* mit seiner großen Terz *E*, seiner Quinte *G* und seiner Octave *c* bilden den *C* dur-Accord.

Nach den eben angegebenen Verhältnissen machen gleichzeitig

C	*E*	*F*	*G*	*c*
1	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	2

Schwingungen.

Um die Reihe der Töne gehörig zu vervollständigen, müssen nun aber *E*, *F* und *G* ebenso ihre Accorde, also ihre Terz und Quinte haben wie *C*.

Die Quinte von *G* ist ein Ton, welcher $^3/_2$ mal so viel Schwingungen macht als *G*; auf 1 Schwingung von *C* kommen also $^3/_2 \, . \, ^3/_2 = \, ^9/_4$ Schwingungen des fraglichen Tones, den wir mit *d* bezeichnen wollen. Die nächst tiefere Octave von *d*, welche mit *D* bezeichnet wird, macht also $^9/_8$ Schwingungen, während *C* eine vollendet.

Die große Terz von *G*, die man mit *H* bezeichnet, macht $^5/_4$ mal so viel Schwingungen als *G*, also $^3/_2 \, . \, ^5/_4 = \, ^{15}/_8$ mal so viel Schwingungen als *C*.

Die Schwingungszahl der Quinte von *F* ist $^4/_3 \, . \, ^3/_2 = 2$, die Octave von *C* ist also zugleich die Quinte von *F*.

Die Schwingungszahl der großen Terz von *F*, eines Tones, den man mit *A* bezeichnet, ist $^4/_3 \, . \, ^5/_4 = \, ^5/_3$ mal so groß als die Schwingungszahl von *C*.

So haben wir denn eine Reihe von Tönen, welche den Namen der diatonischen Tonleiter führt. Es machen gleichzeitig

C	*D*	*E*	*F*	*G*	*A*	*H*	*c*	*d* ... *g*	
1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2	$^9/_4$ ... 3	Schwingungen.

D ist die Secunde, *A* ist die große Sexte, *H* ist die Septime und *g*, die Quinte der Octave, ist die Duodecime des Grundtones *C*. Auf 1 Schwingung von *C* kommen 3 Schwingungen seiner Duodecime.

Die Intervalle, d. i. die Quotienten der Schwingungszahlen von je zwei auf einander folgenden Tönen dieser Reihe, sind einander nicht gleich. In der folgenden Reihe giebt der zwischen zwei Buchstaben etwas tiefer gesetzte Bruch an, wie

vielmal größer die Schwingungszahl eines Tones ist als die des nächst vorhergehenden:

$$\begin{matrix} C & & D & & E & & F & & G & & A & & H & & c. \\ & 9/8 & & 10/9 & & 16/15 & & 9/8 & & 10/9 & & 9/8 & & 16/15 & \end{matrix}$$

In gleichen Zeiten macht also D $^9/_8$ mal so viel Schwingungen als C, E $^{10}/_9$ mal so viel als D, F $^{16}/_{15}$ mal so viel als E u. s. w.

Das Intervall von C zu D, von D zu E, von F zu G, von G zu A, von A zu H heißt ein ganzer Ton. Man unterscheidet aber große ganze Töne, wenn das Intervall $^9/_8$, und kleine, wenn es $^{10}/_9$ beträgt.

Die Intervalle zwischen E und F, zwischen H und c weichen nahezu nur halb so viel von der Einheit ab wie die übrigen, sie werden deshalb halbe Töne genannt.

Wenn man, von den anderen Tönen der obigen Tonleiter ausgehend, in derselben Ordnung von Intervallen fortschreitet, so erhält man die verschiedenen Dur-Tonleitern; um aber dieses Fortschreiten von jedem Tone aus möglich zu machen, müssen noch zwischen C und D, D und E, F und G, G und A, A und H halbe Töne eingeschaltet werden, die mit *cis*, *dis*, *fis* u. s. w. bezeichnet werden. Eine nach lauter halben Tönen fortschreitende Tonleiter wird eine chromatische genannt.

Bei den Dur-Tonarten geht man vom Grundtone zur großen Terz, und dann, um eine kleine Terz fortschreitend, zur Quinte über; bei den Moll-Tonarten hingegen ist der Accord durch den Grundton, die kleine Terz und die Quinte gebildet.

Eine nähere Besprechung der Tonarten und Tonleitern gehört mehr in die Theorie der Musik, als hierher.

Wenn der Grundton 1 Schwingung in einer bestimmten Zeit macht, so muß seine große Terz in derselben Zeit $^5/_4$, die große Terz dieses 2ten Tones $^5/_4 . ^5/_4$ oder $^{25}/_{16}$ und die Terz dieses 3ten Tones endlich $^5/_4 . ^5/_4 . ^5/_4$ oder $^{125}/_{64}$ Schwingungen machen. Der letztere Ton stimmt nun nicht genau mit der Octave des Grundtones überein, welcher $^{128}/_{64}$ Schwingungen entsprechen; wenn man also in reinen Terzen fortschreitet, so kommt man nicht zu der reinen Octave, und will man die Reinheit der Octaven erhalten, so muß man von der vollkommenen Reinheit der Terzen abstrahiren. Aehnliches ergiebt sich beim Fortschreiten nach reinen Quinten. Man ist deshalb, um die Reinheit der Octaven zu erhalten, genöthigt, in der Musik die Töne etwas höher oder tiefer zu stimmen, als es die reinen Terzen oder Quinten verlangen; man muß, wie die Musiker sagen, den Ton etwas oberhalb oder unterhalb schweben lassen. Diese Ausgleichung nennt man die Temperatur. Bei der allgemein angewendeten gleichschwebenden Temperatur werden die Intervalle der 12 halben Töne einer Octave einander gleich gemacht. Bezeichnen wir also das Intervall eines halben Tones der gleichschwebenden Temperatur mit a, die Schwingungszahl des Grundtones mit z, so ist die Schwingungszahl seiner Secunde $z a^2$, seiner großen Terz $z a^4$, seiner Quinte $z a^7$ und endlich die seiner

Octave $z a^{12}$. Da aber die Schwingungszahl der Octave auch gleich $2z$ ist, so haben wir

$$a^{12} = 2,$$

also

$$a = \sqrt[12]{2} = 1{,}05946,$$

während das Intervall eines reinen halben Tones (e zu f) $\frac{16}{15} = 1{,}0666$ und das Intervall der Hälfte eines reinen kleinen ganzen Tones (d zu e) $\sqrt{\frac{10}{9}}$ $= \sqrt{1{,}111} = 1{,}054$ ist.

Wenn unser Ohr empfindlicher wäre, so würde es durch die erwähnte Unreinheit der Töne, namentlich der Terzen und Sexten unangenehm berührt werden; es würde kaum ein musikalischer Genuß möglich sein.

Nach den Bezeichnungen, welche wir in diesem Paragraphen kennen gelernt haben, können wir nun auch die verschiedenen Töne benennen, welche eine und dieselbe Röhre giebt. Die Obertöne einer gedeckten Pfeife sind diejenigen, deren Schwingungszahl ein ungerades Vielfaches von der Schwingungszahl des Grundtones, also 3mal, 5mal u. s. w. größer ist; also die Quinte der Octave, welche auch die Duodecime genannt wird, die große Terz der zweiten Octave u. s. w.

In die Reihe der Obertöne einer offenen Pfeife gehören aber alle Töne, deren Schwingungszahl ein ganzes Vielfaches von der Schwingungszahl des Grundtones ist, also die Töne, deren Schwingungszahl 2mal, 3mal, 4mal, 5mal, 6mal u. s. w. größer ist; diese Töne sind aber die Octave des Grundtones, die Quinte der Octave, die zweite Octave, die große Terz der zweiten Octave, die Quinte der zweiten Octave u. s. w.

Schwingungszahl der musikalischen Töne. Aus Gleichung 2) Seite 189 ergiebt sich 110

$$z = \frac{n}{\lambda},$$

wir finden also die Schwingungszahl eines Tones, wenn wir seine Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch seine Wellenlänge (in demselben Mittel) dividiren.

Für Luft ist, wie wir in §. 103 gesehen haben, $n = 340{,}89$ m; wir haben also

$$z = \frac{340{,}89}{\lambda}.$$

Die Wellenlänge eines Tones in der Luft ist aber nach §. 105 gleich der 4fachen Länge der gedeckten Pfeife, welche ihn als ihren Grundton giebt.

Der tiefste Ton, welcher in der Musik zur Anwendung kommt, ist der Grundton einer gedeckten 5,28 m langen Orgelpfeife. Für diesen Ton ist also $\lambda = 21{,}12$ m, mithin seine Schwingungszahl

$$z = \frac{340,89}{21,12} = 16,1,$$

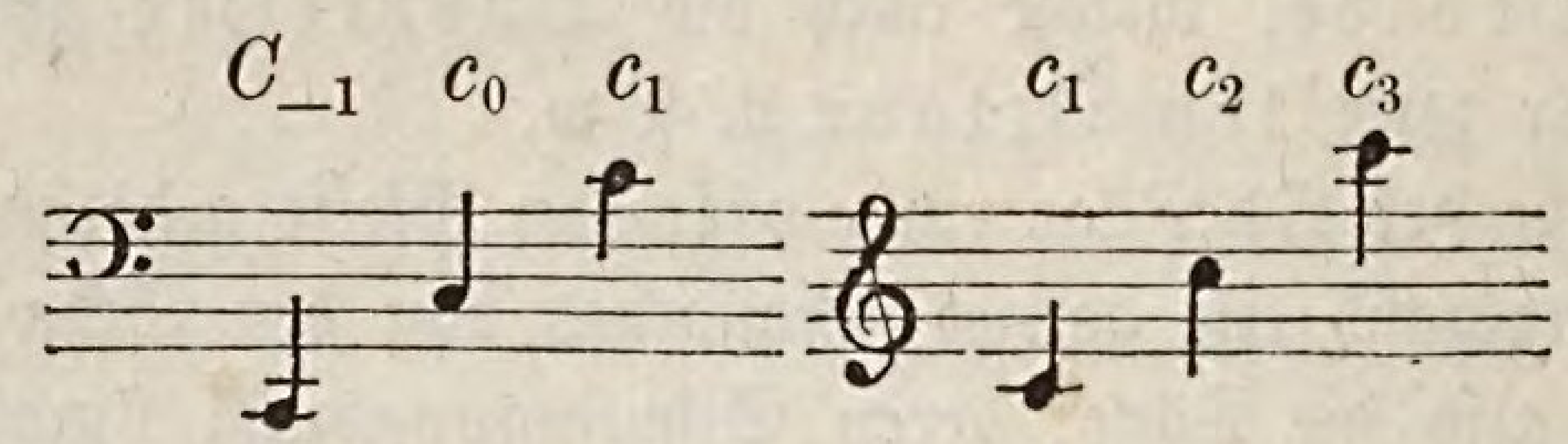
wofür wir der Kürze wegen die Zahl 16 setzen wollen. Im Ganzen umfaßt die Musik 9 Octaven. Der erwähnte tiefste Ton einer 5,28 m langen gedeckten Pfeife wird als das Subcontra C bezeichnet.

Da dieser Ton nun 16 Schwingungen in der Secunde macht, so sind die Schwingungszahlen der auf einander folgenden Octaven dieses Tones:

des Subcontra C	C_{-3} . . .	16
des Contra C	C_{-2} . . .	32
des großen C	C_{-1} . . .	64
des kleinen C	c_0	128
des eingestrichenen C . . .	c_1	256
des zweigestrichenen C . .	c_2	512
u. s. w.		

Es ist hier die Bezeichnung c_1, c_2 u. s. w. statt der sonst gebräuchlichen $\bar{c}$, $\bar{\bar{c}}$ u. s. w. gesetzt, welche für höhere Octaven wegen der vielen horizontal über einander zu setzenden Striche unbequem wird.

Mit unseren Noten werden die Töne folgendermaßen bezeichnet:



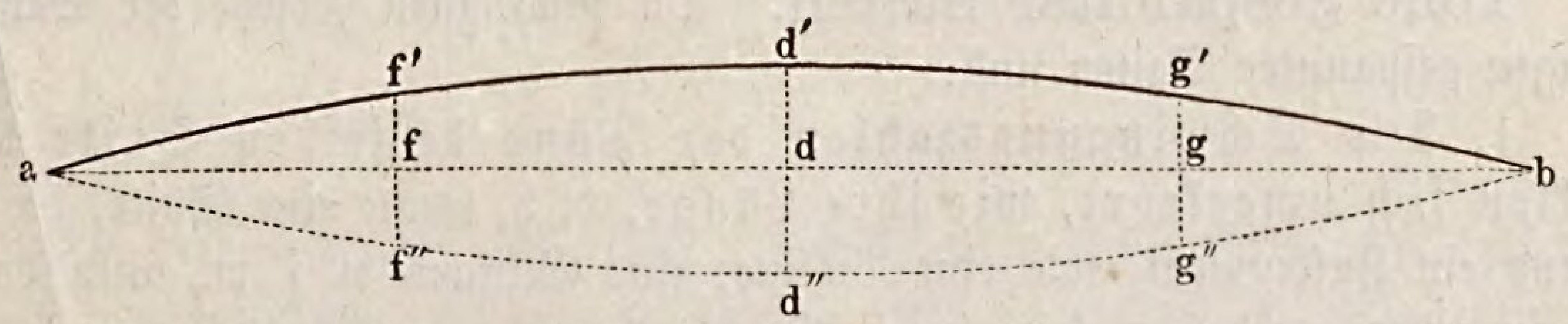
Das sogenannte Stimmgabel-a ist das a der eingestrichenen Octave, also a_1 und seine Schwingungszahl also $256 \cdot \frac{5}{3} = 427$. In den meisten Orchestern aber wird die Stimmung der Instrumente höher getrieben und zwar so, daß man für das Stimmgabel-a einen Ton von 430, 440, ja sogar von 444 Schwingungen in der Secunde nimmt.

Zweites Capitel.

Gesetze der Schwingungen und Töne fester Körper.

Gespannte Saiten. Wenn eine gespannte Saite auf irgend eine Weise, sei es durch Anschlag, durch Zupfen, oder durch Streichen mit dem Violinbogen aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht wird, so geräth sie in den Zustand stehender Schwingungen. Der einfachste Fall ist der, daß die Saite der ganzen Länge nach schwingt, wie es Fig. 219 dargestellt ist. Alle Theilchen befinden 111

Fig. 219.

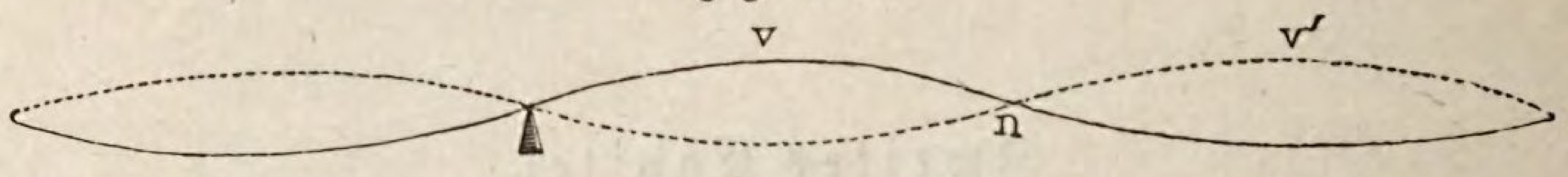


sich gleichzeitig auf der einen und dann wieder auf der anderen Seite der Gleichgewichtslage, sie erreichen gleichzeitig das Maximum der Entfernung von der Gleichgewichtslage auf der einen Seite, gehen dann gleichzeitig durch die Gleichgewichtslage hindurch und kommen hierauf gleichzeitig wieder an der Gränze ihrer Bahnen auf der anderen Seite an. Dieser Schwingungszustand einer gespannten Saite wird unter anderem hervorgebracht, wenn man sie nahe an einem ihrer Endpunkte mit einem Violinbogen streicht; die Saite giebt alsdann ihren Grundton.

Während alle Theilchen einer gespannten Saite, welche im Zustand stehender Schwingungen sich befindet, ihre Schwingungen vollkommen gleichzeitig ausführen, ist die Schwingungsweite für verschiedene Theilchen sehr ungleich. Für den eben betrachteten Fall ist die Schwingungsweite am größten in der Mitte der Saite. Diejenigen Stellen gespannter Saiten, für welche die Schwingungsweite am größten ist (dd' Fig. 219), werden Bäuche oder Maxima genannt.

Die Obertöne der gespannten Saite entstehen, wenn sie sich in mehrere für sich schwingende Abtheilungen theilt, welche durch ruhende Stellen oder Schwingungsknoten von einander getrennt sind. Solche Schwingungsknoten lassen sich an gespannten Saiten unter anderem dadurch hervorbringen, daß man an geeigneter Stelle einen Steg anbringt, auf welchem die Saite lose aufliegt. Setzt man z. B., wie dies Fig. 220 erläutert, den Steg so, daß durch ihn die ganze Saitenlänge in zwei Theile getheilt wird, welche sich verhalten wie 1 zu 2,

Fig. 220.



daß also das kleinere Stück $1/_3$, das größere $2/_3$ der ganzen Saitenlänge beträgt, so entsteht, wenn man das kleinere Stück mit dem Violinbogen streicht, in der Mitte des längeren Saitenstücks bei n ein Schwingungsknoten, während sich ein Maximum bei v, und ein zweites bei v' bildet. Die Knoten lassen sich dadurch nachweisen, daß man an verschiedenen Stellen der Saite leichte Papierreiterchen aufsetzt, welche beim Anspielen der Saite auf den Knotenpunkten sitzen bleiben, während sie sonst überall abgeworfen werden.

Wenn man den Steg so setzt, daß durch ihn die Saite in zwei Theile getheilt wird, von denen der kleinere $1/_4$ der ganzen Länge der Saite ist, so bilden sich, wenn man diesen kleineren Theil mit dem Violinbogen anstreicht, im größeren zwei Knoten und drei Maxima.

112 **Töne gespannter Saiten.** Die wichtigsten Gesetze der Schwingungen gespannter Saiten sind:

1. Die Schwingungszahlen der Töne derselben Saite verhalten sich umgekehrt, wie ihre Länge, d. h. wenn eine Saite, die auf irgend ein Instrument, wie eine Violine, eine Guitarre u. s. w., aufgespannt ist, in einer gegebenen Zeit eine bestimmte Anzahl von Schwingungen macht, so macht sie in derselben Zeit 2=, 3=, 4 mal u. s. w. so viel Schwingungen, wenn man bei unveränderter Spannung nur $1/_2$, $1/_3$, $1/_4$ u. s. w. der ganzen Länge schwingen läßt.

2. Die Schwingungszahl einer Saite ist der Quadratwurzel aus den spannenden Gewichten proportional, d. h. wenn das Gewicht, welches die Saite spannt, 4=, 9=, 16 mal so groß gemacht wird, während die Länge unverändert bleibt, so wird die Schwingungszahl der Saite 2=, 3=, 4 mal so groß.

3. Die Schwingungszahlen verschiedener Saiten desselben Stoffes verhalten sich umgekehrt wie ihre Dicke. Wenn man z. B. zwei Stahlsaiten von gleicher Länge nimmt, deren Durchmesser sich wie 1 zu 2 verhalten, so wird die dünnere bei gleicher Spannung in derselben Zeit doppelt so viel Schwingungen machen als die dickere. Für Darmsaiten ist dieses Gesetz wohl nicht immer genau wahr, weil das Material derselben nicht immer hinlänglich gleichartig ist.

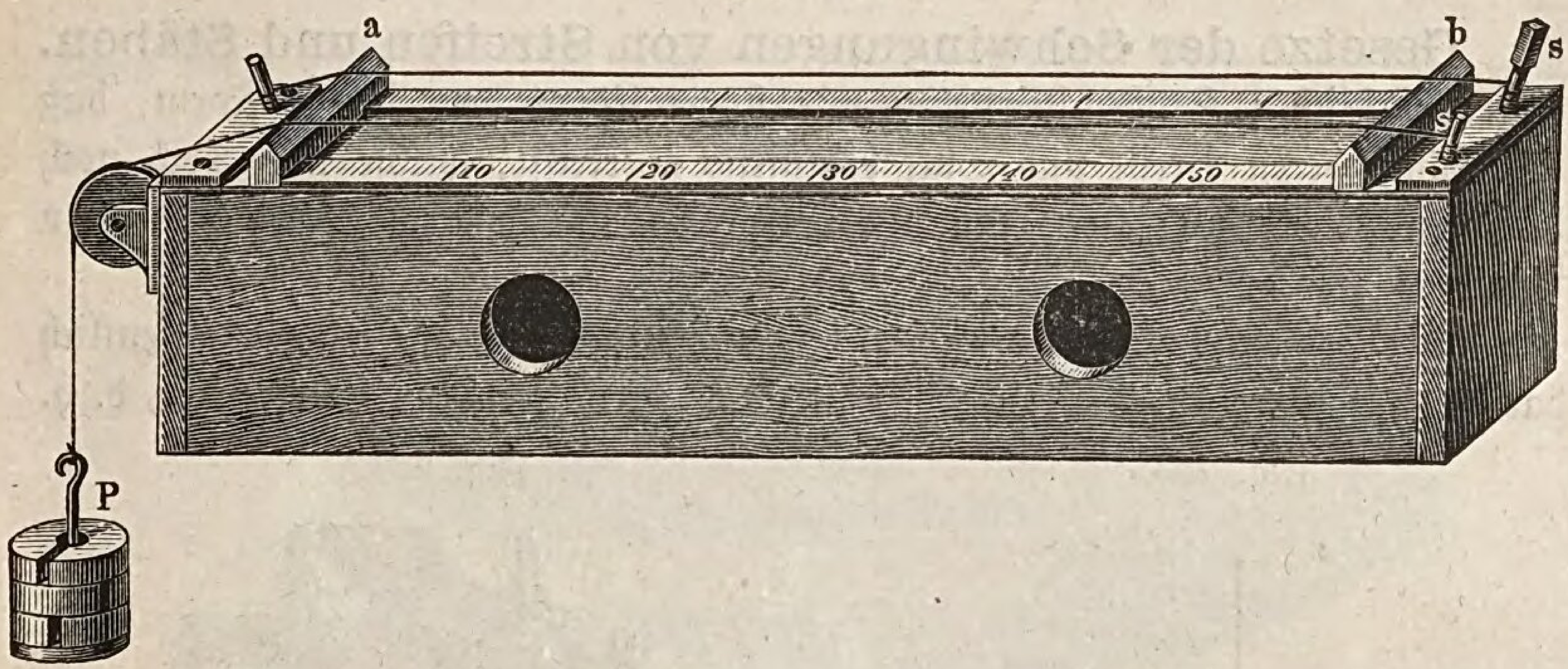
Bezeichnet man mit z die Schwingungszahl einer Saite (d. h. die Anzahl der Schwingungen, welche sie in einer Secunde macht), so ist demnach

$$z = \frac{A}{l \cdot d} \sqrt{s},$$

wenn A ein constanter Factor, l die Länge, d der Durchmesser und s die Spannung der Saite bezeichnet. Der Factor A ändert sich mit der Substanz.

Um die wichtigsten Gesetze der Schwingungen gespannter Saiten und ihrer Töne durch den Versuch nachzuweisen, bedient man sich eines Instrumentes, welches reine Töne giebt und erlaubt, die Länge der Saiten mit Genauigkeit zu messen. Dieses Instrument heißt Monochord, obgleich es in der Regel mit mehr als einer Saite versehen ist. Fig. 221 stellt ein solches Monochord mit zwei Saiten dar.

Fig. 221.



Die beiden Saiten sind über einen Kasten aufgespannt, der aus vier starken Seitenbrettern besteht, auf welche oben ein Resonanzboden, d. h. ein ganz dünnes Brett von Tannenholz, geleimt ist, dessen Bedeutung später erläutert werden wird. Die beiden Stege a und b begränzen den frei schwingenden Theil der Saiten. Die eine derselben wird durch die Gewichte P gespannt, die andere dagegen durch den Stimmstock s.

Betrachten wir zuerst den Zusammenhang, welcher zwischen der Spannung der Saite und der Tonhöhe besteht.

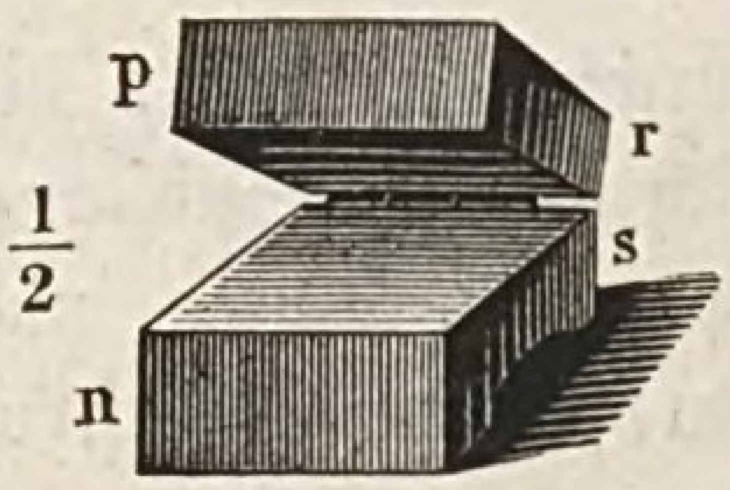
Wenn die Saite durch ein Gewicht $P = 1{,}6$ kg gespannt einen bestimmten Ton giebt, den wir mit c bezeichnen wollen, so muß man

das Gewicht 2,5 kg anhängen, um die große Terz,
" " 3,6 kg " " " Quinte,
" " 6,4 kg " " " Octave

von c zu erhalten. Nun verhalten sich aber die Zahlen 1,6 : 2,5 : 3,6 : 6,4 zu einander wie $1 : \frac{25}{16} : \frac{9}{4} : 4$ oder wie die Quadrate von 1, $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$ und 2, wodurch der Satz unter Nr. 2 bewiesen ist.

Um das Gesetz unter Nr. 1 experimentell zu bestätigen, ist es bequemer, die zweite Saite anzuwenden. Man kann dieselbe entweder ihrer ganzen Länge nach oder nur einen Theil ihrer Länge schwingen lassen, indem man einen beweglichen Steg, Fig. 222, unter eine bestimmte Stelle der Saite hinschiebt und durch Aufdrücken des Deckels *pr* ein entsprechendes Stück der Saite abgränzt.

Fig. 222.



Von dem Grundton, welchen die Saite giebt, wenn man sie ihrer ganzen Länge nach schwingen läßt, erhält man:

die große Terz, wenn der frei schwingende Theil 4/5,
die Quinte, " " " " " 2/3,
die Octave, " " " " " 1/2

der ganzen Saitenlänge beträgt.

113 Gesetze der Schwingungen von Streifen und Stäben.

Unter elastischen Stäben verstehen wir starre Körper von solcher Form, daß ihre Länge deren Breite und Dicke bedeutend übertrifft, welche aber doch noch breit und dick genug sind, um auch ohne Spannung durch äußere Kräfte zu schwingen und zu tönen.

Die Schwingungsweise und die Töne elastischer Stäbe hängen wesentlich davon ab, auf welche Weise sie befestigt sind. Seiner ganzen Länge nach, d. h.

Fig. 223.

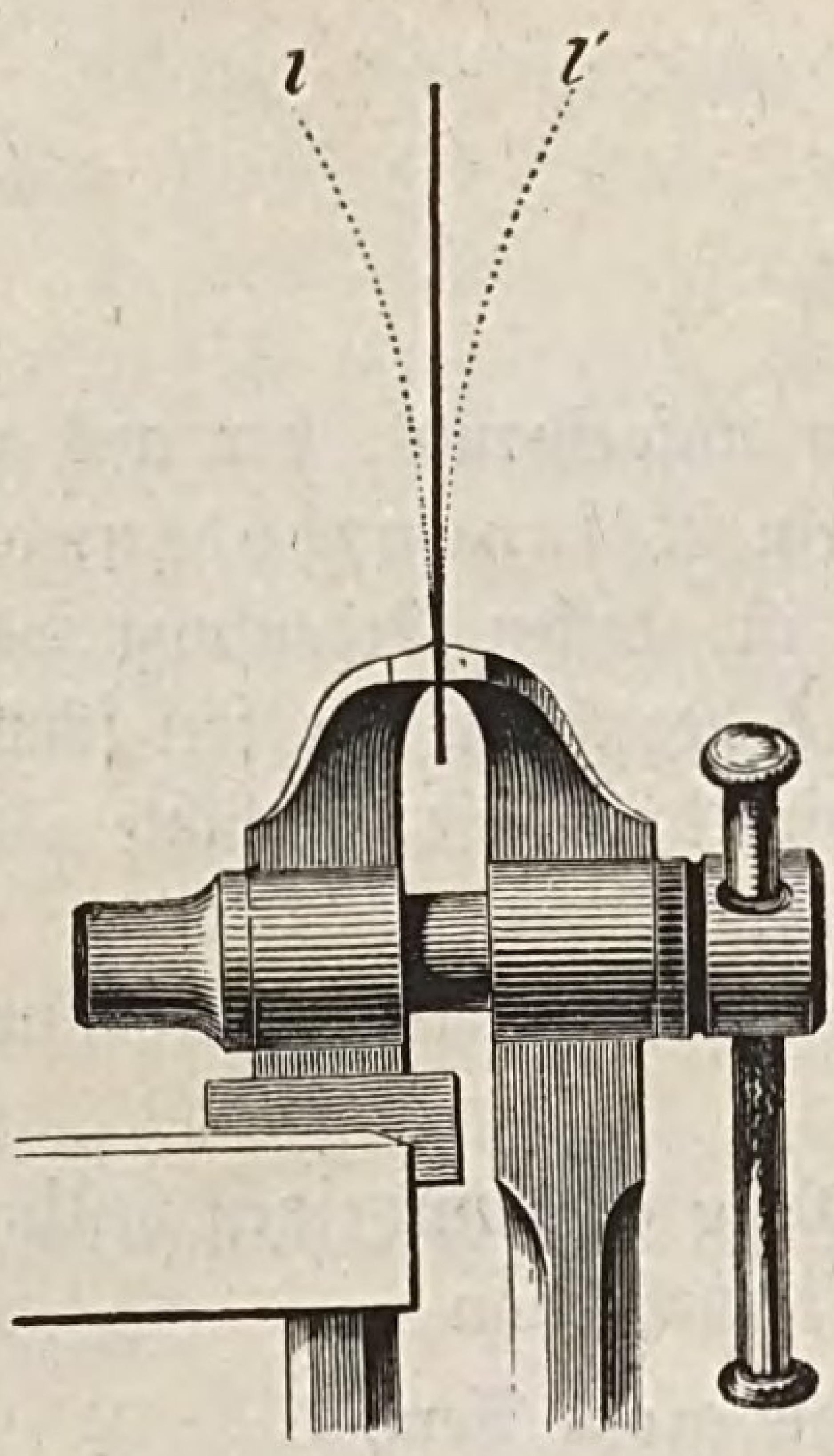


Fig. 224.

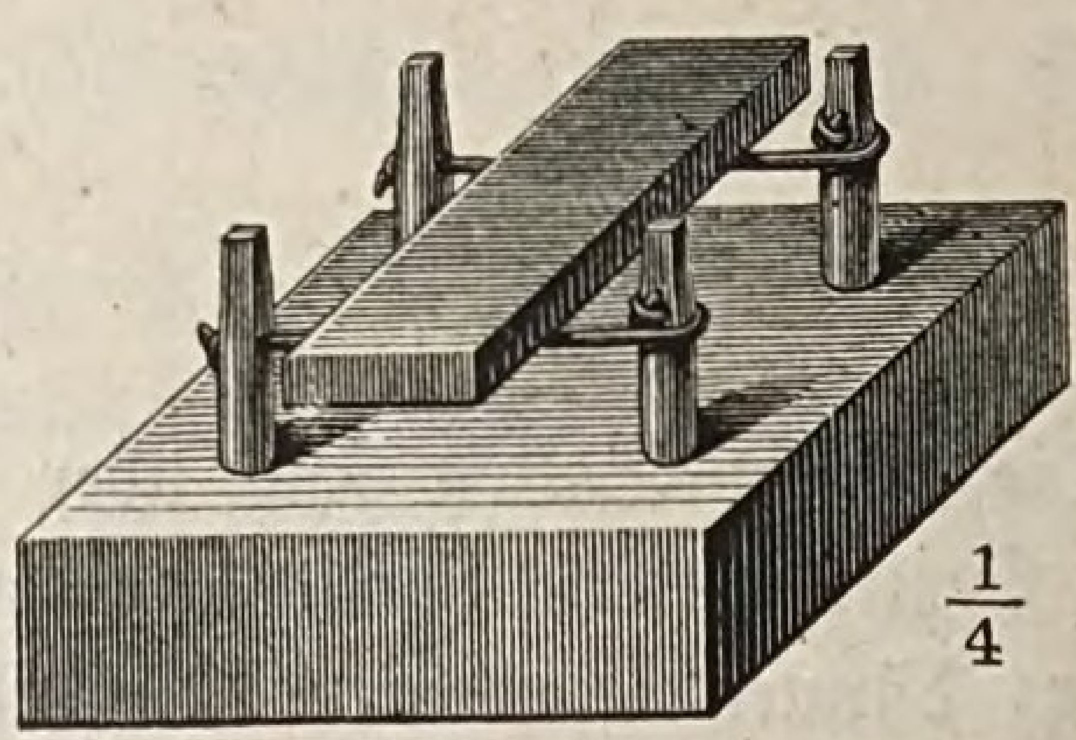
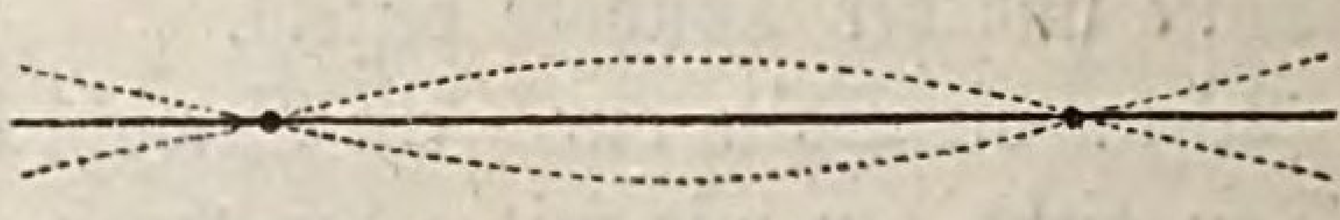


Fig. 225.



ohne Schwingungsknoten kann ein elastischer Stab schwingen, wenn er an dem einen Ende befestigt, an dem anderen aber frei ist. Diese Schwingungsweise erläutert am einfachsten ein Stahlstreifen, etwa ein Stück eines Sägeblattes, welcher in der Weise in einen Schraubstock eingeklemmt ist, wie Fig. 223 zeigt. Dieser Art sind auch die Schwingungen, welche jeder der beiden Schenkel einer tönenden Stimmgabel macht.

Legt man einen Stahlstab, wie Fig. 224 zeigt, über zwei gespannte Schnüre, so giebt er, mit einem hölzernen Hämmerchen angeschlagen, einen vollen Ton; dabei theilt sich der Stab so in schwingende Abtheilungen, wie Fig. 225 andeutet. Jeder der beiden Schwingungsknoten ist um $1/5$ der ganzen Stablänge von dem einen Stabende entfernt. Die Lage dieser Schwingungsknoten kann man mittelst Sand sichtbar machen, welchen man auf den Stahlstab streut.

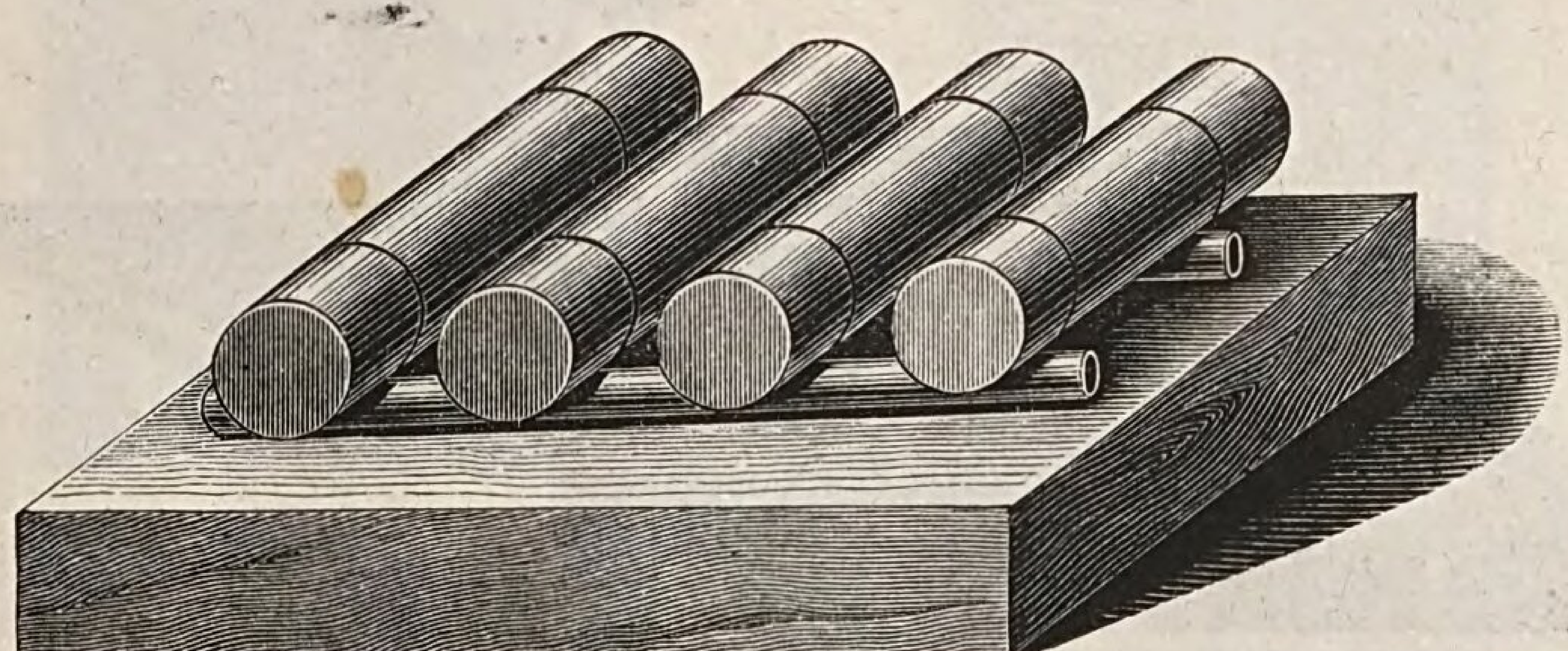
Nach diesem Principe ist auch die bekannte **Glasharmonika** construirt.

Für Stäbe, welche in gleicher Weise schwingen, ist **die Schwingungszahl dem Quadrate** der Stablänge umgekehrt und der Dicke (in der Richtung der Schwingungen) direct proportional, während die Breite des Stabes auf die Tonhöhe ohne Einfluß ist. Für die Schwingungszahl elastischer Stäbe und Platten haben wir also die Gleichung

$$z = C \frac{e}{l^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wenn e die Dicke und l die Länge des Stabes oder der Platte bezeichnet, wäh-

Fig. 226.



rend C ein constanter Factor ist, welcher für verschiedene Substanzen verschiedene Werthe hat und welcher außerdem davon abhängt, wie der schwingende Körper durch Schwingungsknoten abgetheilt ist, ob er also seinen Grundton oder einen seiner Obertöne giebt.

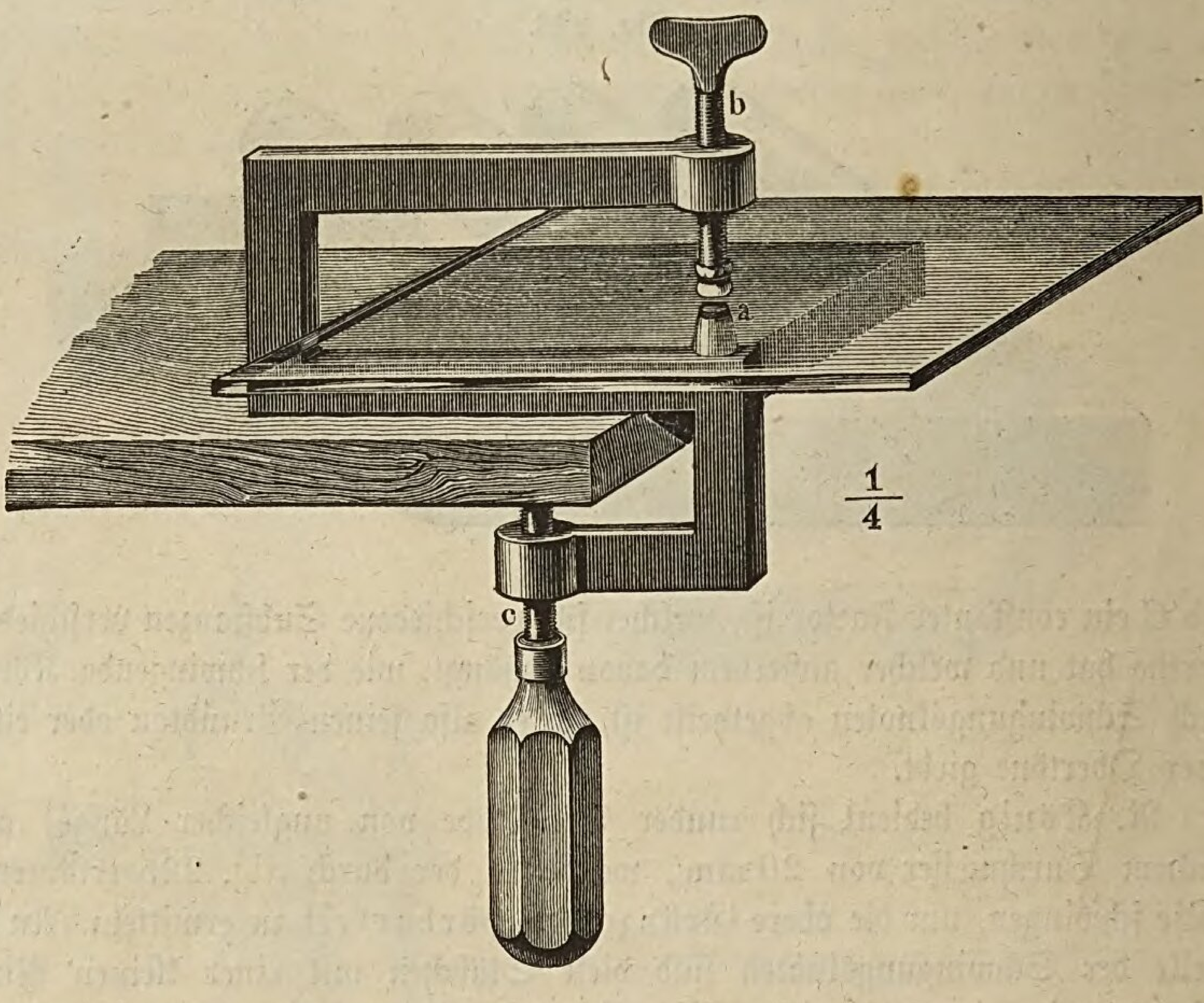
R. **König** bedient sich runder Stahlstäbe von ungleicher Länge, aber gleichem Durchmesser von 20 mm, welche in der durch Fig. 225 erläuterten Weise schwingen, um die obere **Gränze der Hörbarkeit** zu ermitteln. An der Stelle der Schwingungsknoten sind diese Stäbchen mit einer kleinen Rinne versehen, wie Fig. 226 zeigt. Mit ihren Schwingungsknoten werden sie auf Kautschukröhren aufgelegt, welche in convergirender Richtung auf ein Brett aufgeleimt sind.

Der längste dieser Stäbe ist 149 mm lang und giebt mit einem harten Klöppel angeschlagen das fünfgestrichene c (c_5), welches 4096 Schwingungen in der Secunde macht. Die Länge dieses Stabes verhält sich zur Länge des zweiten, dritten und vierten wie $1 : \sqrt{\frac{1}{2}} : \sqrt{\frac{1}{4}} : \sqrt{\frac{1}{8}}$, folglich verhalten

sich die Schwingungszahlen dieser Stäbe wie 1 : 2 : 4 : 8, der zweite Stab giebt somit die erste, der dritte die zweite, der vierte die dritte Octav von c_5; die Töne der Stäbe sind demnach das fünf-, sechs-, sieben- und achtgestrichene *c*. Während nun der Ton des längsten Stabes so voll und kräftig ist, daß man das Klappen beim Anschlagen des Hammers kaum hört, wird es bei den kürzeren Stäben immer merklicher, während ihr Ton immer schwächer und feiner wird, bis er endlich völlig verschwindet. Aeltere Personen können meist das 7 gestrichene *c* (16 384 Schwingungen) nicht mehr hören, das 7 gestrichene *g* (24 576 Schwingungen) aber ist der höchste Ton, welcher überhaupt noch gehört wird.

114 **Klangfiguren.** In Platten, Glocken 2c. lassen sich ebenfalls stehende Schwingungen hervorbringen. Um Platten in schwingende Bewegung zu versetzen, kann man die Schraubzwinge, Fig. 227, anwenden, welche an einen

Fig. 227.



Tisch angeschraubt wird. Die Platte wird zwischen den kleinen Kegel *a* und die Schraube *b* gebracht, welche beide in einem Stückchen Kork oder Leder endigen. Wenn die Platte gehörig fest geschraubt ist, kann man die Schwingungen durch Anstreichen mit dem Violinbogen hervorbringen.

Man kann auf diese Weise Platten von Holz, Glas, Metall in Schwingungen versetzen, sie mögen nun dreieckig, viereckig, rund, elliptisch, oder sonst wie geformt sein. Die schwingenden Platten erzeugen ebenso wie die schwingenden Saiten eine große Anzahl von Tönen, welche bald höher, bald tiefer sind. Man

beobachtet ferner, daß sich die Platte für jeden dieser Töne in mehrere für sich **schwingende Flächenstücke** theilt, welche durch **Ruhelinien** oder **Knotenlinien** getrennt sind. Im Allgemeinen wird die Ausdehnung der schwingenden Theile um so kleiner, die Knotenlinien werden also um so zahlreicher, je höher der Ton wird.

Um diese Knotenlinien nachzuweisen, streut man auf die obere Fläche der Tafel feinen trockenen Sand, welcher während des Tönens in die Höhe hüpft und niederfällt und sich endlich an den Knotenlinien anhäuft. Auf diese Weise entstehen die sogenannten **Klangfiguren**, welche von dem deutschen Physiker **Chladni** (1756 bis 1827), dem Begründer der wissenschaftlichen Akustik, zuerst dargestellt wurden.

Mit derselben Platte lassen sich, wie schon bemerkt, eine Menge verschiedener Figuren erzeugen, je nachdem man an verschiedenen Stellen des Randes mit dem Violinbogen streicht, während man andere Stellen des Randes mit dem

Fig. 228.



Fig. 229.

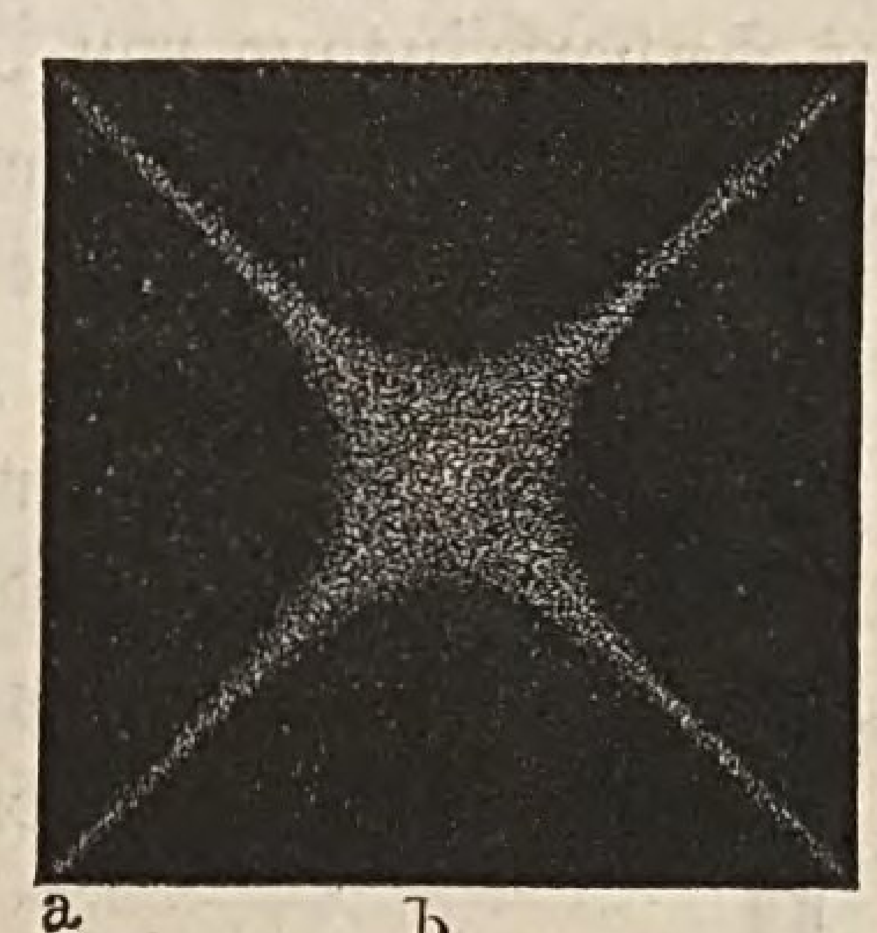
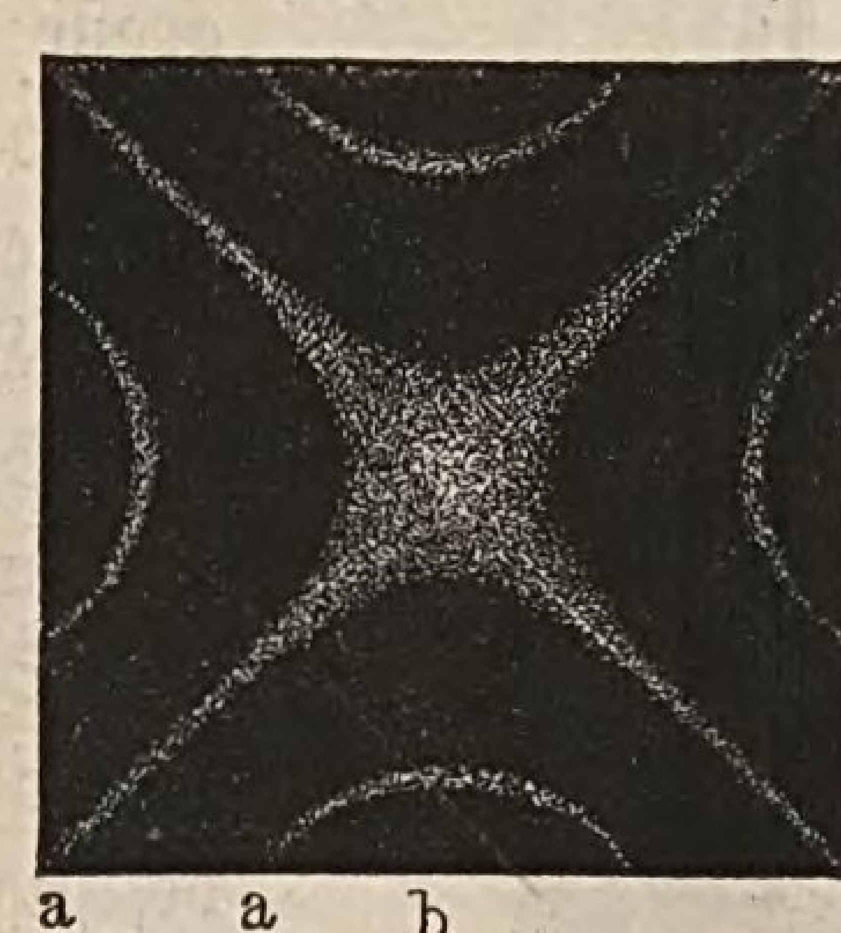


Fig. 230.



Fig. 231.



Finger berührt. Fig. 228 bis Fig. 231 zeigen einige Klangfiguren quadratischer, in ihrer Mitte eingeklemmter Scheiben. Man erhält diese Figuren, wenn man an der mit *b* bezeichneten Stelle streicht und an die mit *a* bezeichneten Punkte einen Finger anhält.

Gerade so wie ebene Platten, theilen sich auch **Glocken** beim Tönen in einzelne vibrirende, durch Knotenlinien getrennte Abtheilungen.

Longitudinalschwingungen der Saiten und Stäbe. Wir 115
haben bisher nur die Querschwingungen der Saiten und Stäbe betrachtet; die-

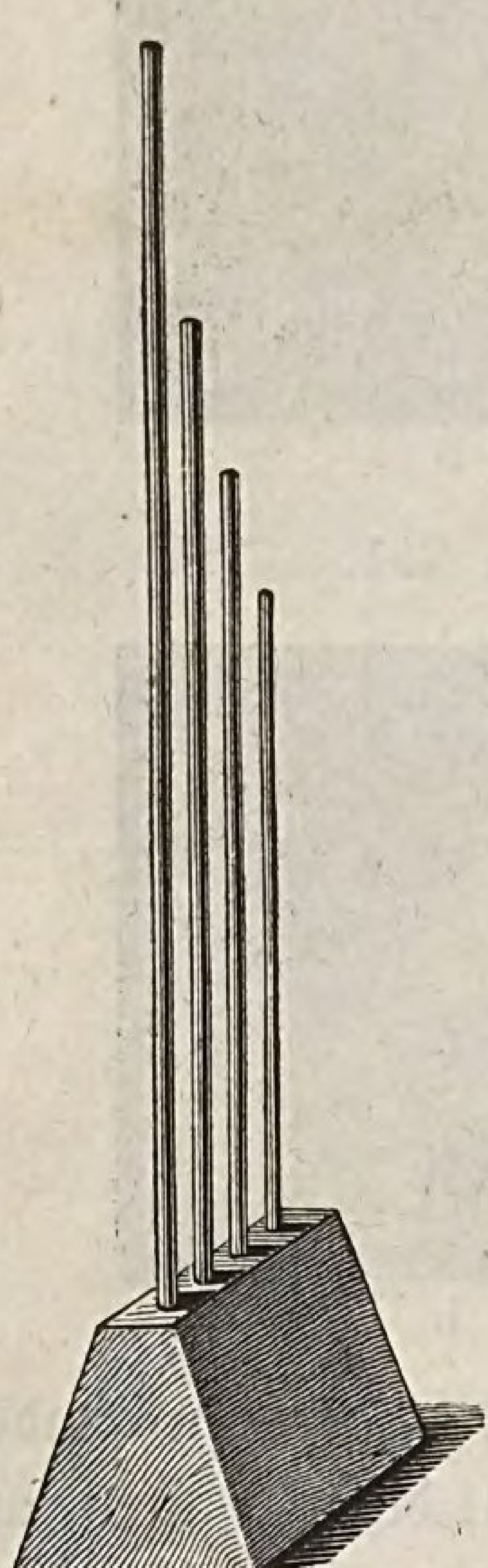
selben können aber auch ihrer Länge nach schwingen, ganz ähnlich wie die in einer Röhre eingeschlossene Luftsäule. Solche Längenschwingungen kann man dadurch hervorbringen, daß man eine gespannte Saite unter sehr spitzem Winkel mit einem Violinbogen streicht oder eine Glasröhre mit nassen Fingern oder einem nassen Tuche der Länge nach reibt.

Hält man z. B. eine Glasröhre von etwa 2 m Länge, welche einen Durchmesser von 2 bis $2^1/_2$ cm hat, in der Mitte mit der linken Hand fest, während man die eine Hälfte derselben mit einem in der rechten Hand gehaltenen nassen Tuche reibt, so wird man einen Ton hören, den man mit einiger Geschicklichkeit leicht rein und voll erhalten kann. Die Schwingungen, welche man auf diese Weise erzeugt, sind offenbar Longitudinalschwingungen.

Man erhält dieselben Resultate mit langen cylindrischen und prismatischen vollen Glasstäbchen, mit Röhren und Stäben von Holz und Metall; bei den letzteren wendet man aber statt des nassen Tuches ein mit Harz bestreutes Tuch an.

Zur Hervorbringung von Longitudinalschwingungen hölzerner Stäbe kann man den Apparat Fig. 232 anwenden. In einen Holzklotz von entsprechender Größe sind mehrere Holzstäbchen von 3 bis 6 mm Dicke eingeleimt. Streicht man diese Stäbchen von oben nach unten fahrend zwischen zwei Fingern, zwischen denen man vorher etwas Colophonium zerrieben hat, so entstehen reine volle Töne. Gesetzt, die Länge der Stäbchen verhielte sich wie 30 : 24 : 20 : 15 oder wie $1 : \frac{4}{5} : \frac{2}{3} : \frac{1}{2}$, so geben sie den Grundton, seine große Terz, seine Quinte und seine Octave. Die Schwingungszahlen zweier Stäbe desselben Materials verhalten sich also umgekehrt wie ihre Längen.

Fig. 232.



Stäbe, welche in der Mitte festgehalten, an beiden Enden aber frei sind, verhalten sich in Bezug auf ihre Schwingungsweise und die Reihe ihrer Obertöne wie offene, Stäbe dagegen, welche an einem Ende befestigt sind, wie die in Fig. 232, verhalten sich wie gedeckte Pfeifen.

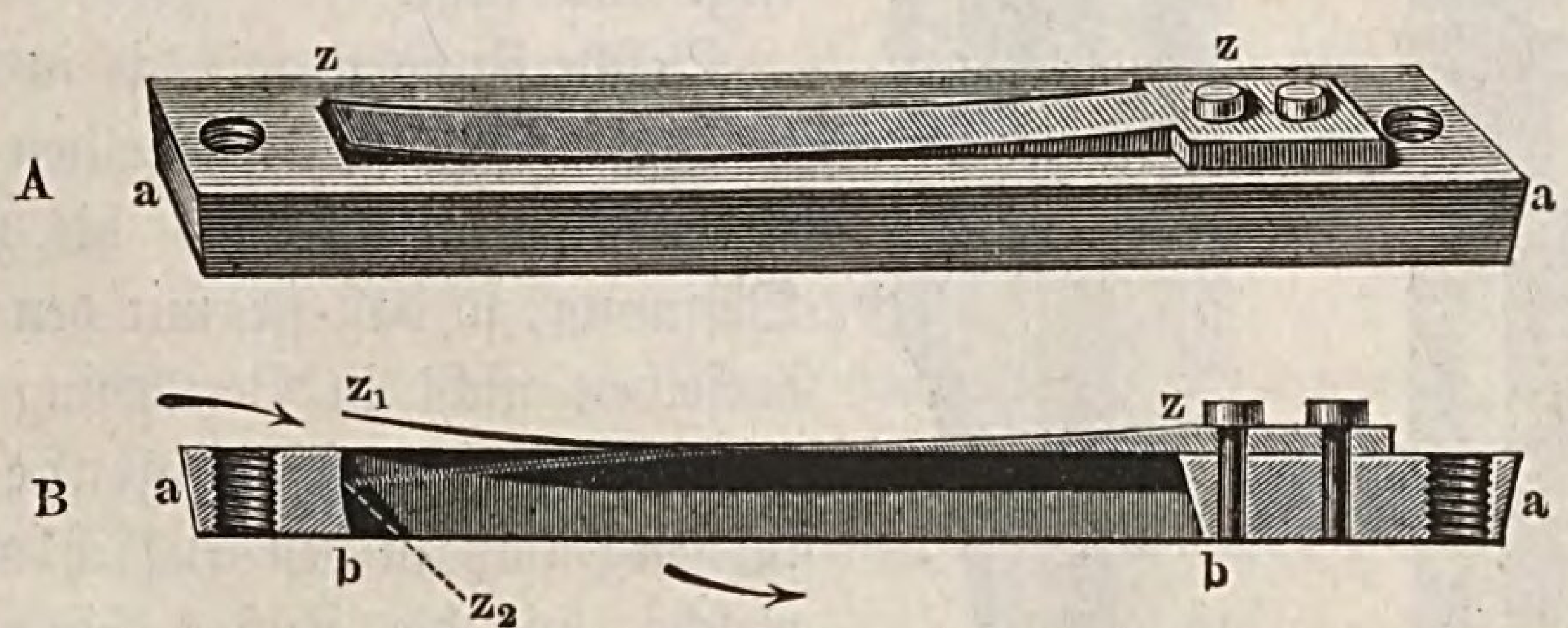
Der tiefste Longitudinalton, welchen ein Stab von Tannenholz giebt, wenn er auf die in Fig. 232 dargestellte Weise befestigt ist, ist derselbe wie der Grundton einer 16 mal kürzeren gedeckten Pfeife. Bei derselben Schwingungszahl ist also eine Viertelswellenlänge in Tannenholz 16 mal länger als eine solche in der Luft; hieraus folgt aber, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Tannenholz 16 mal so groß ist, als in Luft. In gleicher Weise läßt sich auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in anderen festen Körpern ermitteln. Man hat nur die Länge eines in dem einen Ende

festgeklemmten Stabes, welcher longitudinal schwingend einen bestimmten Ton giebt, zu vergleichen mit der Länge einer gedeckten Pfeife von gleicher Tonhöhe.

Zungenpfeifen. Wenn ein Luftstrom aus einer Oeffnung hervor- 116
dringt, welche durch die Vibrationen eines elastischen Körpers in regelmäßigen Intervallen geschlossen und wieder geöffnet wird, so entsteht unter günstigen Umständen ein voller und reiner Ton. Bei jedem Freiwerden der Oeffnung nämlich entsteht ein Luftstoß, welcher eine Verdichtungswelle erzeugt. Solche Instrumente nun, durch welche nach diesem Princip Töne erzeugt werden, nennt man Zungenwerke.

Die einfachste Form der Zungen wird durch Fig. 233 erläutert. In der Mitte einer Messingplatte *aa*, welche in Fig. 233 A perspectivisch, in Fig. 233 B aber im Durchschnitt dargestellt ist, befindet sich eine rectanguläre

Fig. 233.



Oeffnung *bb*, welche durch ein elastisches Metallblättchen *zz* bedeckt wird. In ihrer Ruhelage sowohl wie in der Lage zz_2, Fig. 233 B, wird die Oeffnung durch die Zunge geschlossen, während sie frei ist, wenn die Zunge in der Lage zz_1 ist.

Wenn nun die Messingplatte *aa* die untere Gränzfläche eines geschlossenen Raumes bildet, in welchem durch Einblasen die Luft verdichtet wird, so übt die verdichtete Luft einen Druck auf die Zunge aus, durch welchen die Schwingungen derselben eingeleitet werden; so oft aber die schwingende Zunge in die Lage zz_1 kommt, dringt in der Richtung des Pfeils ein Luftstoß durch die frei gewordene Oeffnung hervor, und so entsteht ein Ton, welcher von der Schwingungsdauer der federnden Zunge abhängt.

Zungen der eben beschriebenen Art sind es, welche die Töne der Mundharmonika, der Blasbalgharmonika und des Harmoniums geben.

Hierher gehören auch die Zungenwerke unserer Orgeln, deren Einrichtung durch Fig. 234 und Fig. 235 (a. f. S.) erläutert wird. In den durchbohrten hölzernen Stopfen *s*, Fig. 235, ist unten eine Rinne *r* von Messingblech befestigt, deren Querschnitt ungefähr einen Halbkreis bildet, und welche den Namen Canile führt. Oben ist diese Rinne offen, unten ist sie geschlossen und ihre seitliche Oeffnung wird durch die elastische Platte *l* bedeckt, welche bei ihren Vibrationen auf die Ränder der Rinne aufschlagend dieselbe vollständig verschließt und dann wieder zurückschwingend einen Luftstrom in die Canile eintreten läßt.

Der Stopfen *s* mit der Canile *r* und der Zunge *l* wird nun in das kurze Rohr *pp* eingesetzt, in welches man von unten her den Wind einblasen kann. Sobald dies geschieht, beginnt die Zunge *l* zu vibriren, es wird also in den durch die Zunge bedingten Intervallen ein Luftstrom aus dem Innern der Röhre *p* durch die Canile und die Höhlung *v* hervordringen, um dann sogleich wieder unterbrochen zu werden. Durch dieses stoßweise Vordringen des Luftstroms aus der Höhlung *v* wird nun der Ton erzeugt, zu dessen Verstärkung man noch ein kegelförmiges Rohr, den Schallbecher, aufsetzt, wie man es in Fig. 234 sieht.

Fig. 234.

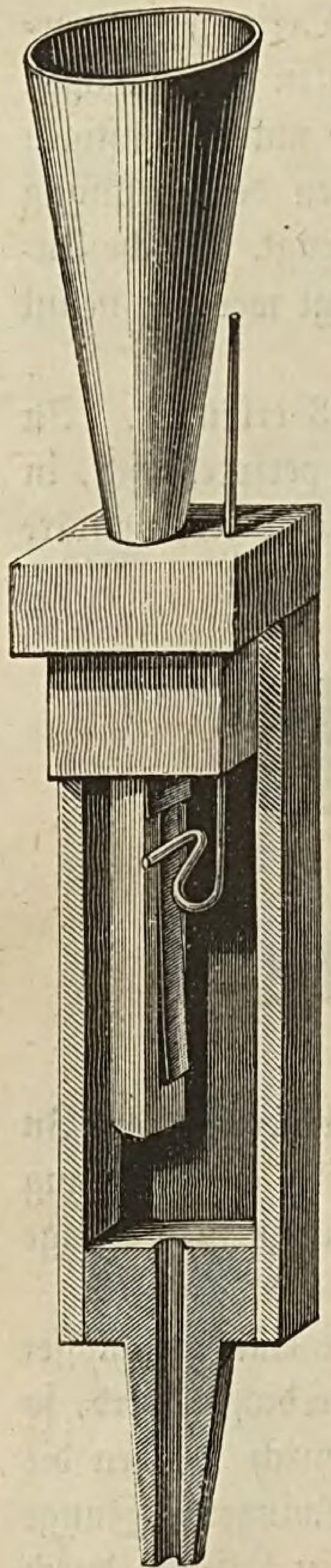
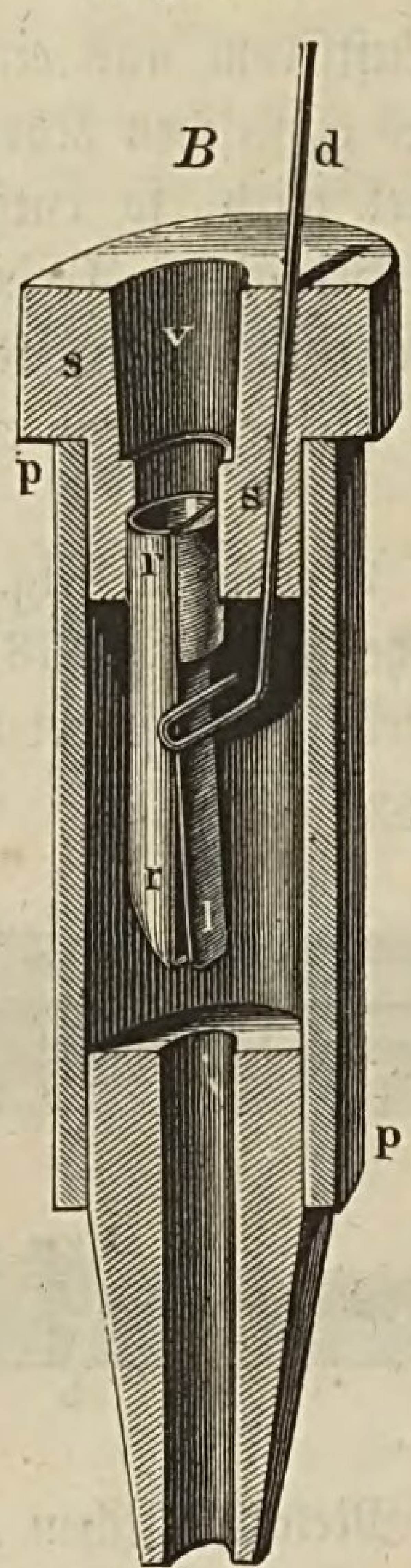


Fig. 235.



Solche Zungen, wie die in Fig. 233 und Fig. 234 dargestellten, welche etwas kleiner sind als die zugehörige Oeffnung, so daß sie mit den Rändern derselben nicht in Berührung kommen, nennt man durchschlagende Zungen, im Gegensatz zu den aufschlagenden, welche, wie die Zunge Fig. 235, bei jeder Oscillation auf die Canile aufschlagen. Die aufschlagenden Zungen werden ihres rasselnden Tones wegen selten mehr gebraucht.

Durch Aufziehen oder Niederdrücken des Stimmdrahtes *d*, dessen unteres horizontal gebogenes Ende die Zunge gegen die Canile andrückt, kann man die Länge des vibrirenden Theils der Zunge vergrößern oder verkleinern und dadurch die Tonhöhe verändern.

Wenn gar kein Schallbecher oder doch nur eine kurze Röhre auf das Zungenwerk aufgesetzt ist, so hängt die Schwingungsdauer der Zunge, also der Ton, den sie giebt, nur von ihrer Elasticität und von ihren Dimensionen ab. Wenn aber eine lange Röhre aufgesetzt wird, so modificirt diese den Ton wesentlich; die Bewegung der Zunge hängt dann mehr von der Bewegung der in der langen Pfeife hin und her laufenden Luftwellen als von ihrer eigenen Elasticität ab; sie wird also eigentlich mehr geschwungen als sie selbst schwingt.

Eine zweite Art von Zungenwerken besteht aus membranösen elastischen Platten, welche die beiden Lippen eines schmalen Spaltes bilden, der sich in Folge ihrer Oscillationen abwechselnd öffnet und wieder schließt. Eine solche membranöse Zungenpfeife läßt sich am einfachsten in folgender Weise herrichten. Von einer Röhre dünnen vulkanisirten Kautschuks, welche

1,5 bis 2 cm weit ist, schneide man ein 4 bis 6 cm langes Stück ab und befestige es am Ende eines Glasrohres von entsprechender Weite, wie man Fig. 236 sieht. Wenn man nun die Kautschukröhre an ihrem oberen Ende an zwei gegenüberliegenden Punkten faßt und auseinanderzieht, so bildet sich eine Ritze, wie unsere Figur zeigt, deren Ränder von Kautschuk sind, und wenn man dann unten in das Rohr hineinbläst, so erhält man einen Ton, der um so höher wird, je stärker die beiden Lippen angespannt werden. Man kann dabei ganz deutlich die Vibrationen der beiden Kautschuklippen sehen, welche die Ritze bilden.

Stösse und Combinationstöne. Wenn zwei Töne von nahezu gleicher Höhe das Ohr treffen, so vernimmt man ein periodisch abwechselndes Anschwellen und Nachlassen des Tones, welches unter dem Namen der Schwebungen bekannt ist und wofür Scheibler (1777 bis 1838) die Bezeichnung der Stöße eingeführt hat. 117

Man hört diese Stöße sehr deutlich, wenn man gleichzeitig zwei Orgelpfeifen tönen läßt, welche so nahe unisono sind, daß der Ton der einen in der Secunde nur um 2, 3, 4 u. s. w. Schwingungen mehr macht als der der anderen. Auch mit zwei Stimmgabeln, welche einer reinen Consonanz sehr nahe stehen, lassen sich die Stöße deutlich wahrnehmen. Besonders geeignet zur Nachweisung der Stöße sind solche Stimmgabeln, welche in der Fig. 237 dargestellten Weise auf Resonanz-Kästchen aufgesetzt sind. Hat man

Fig. 236.

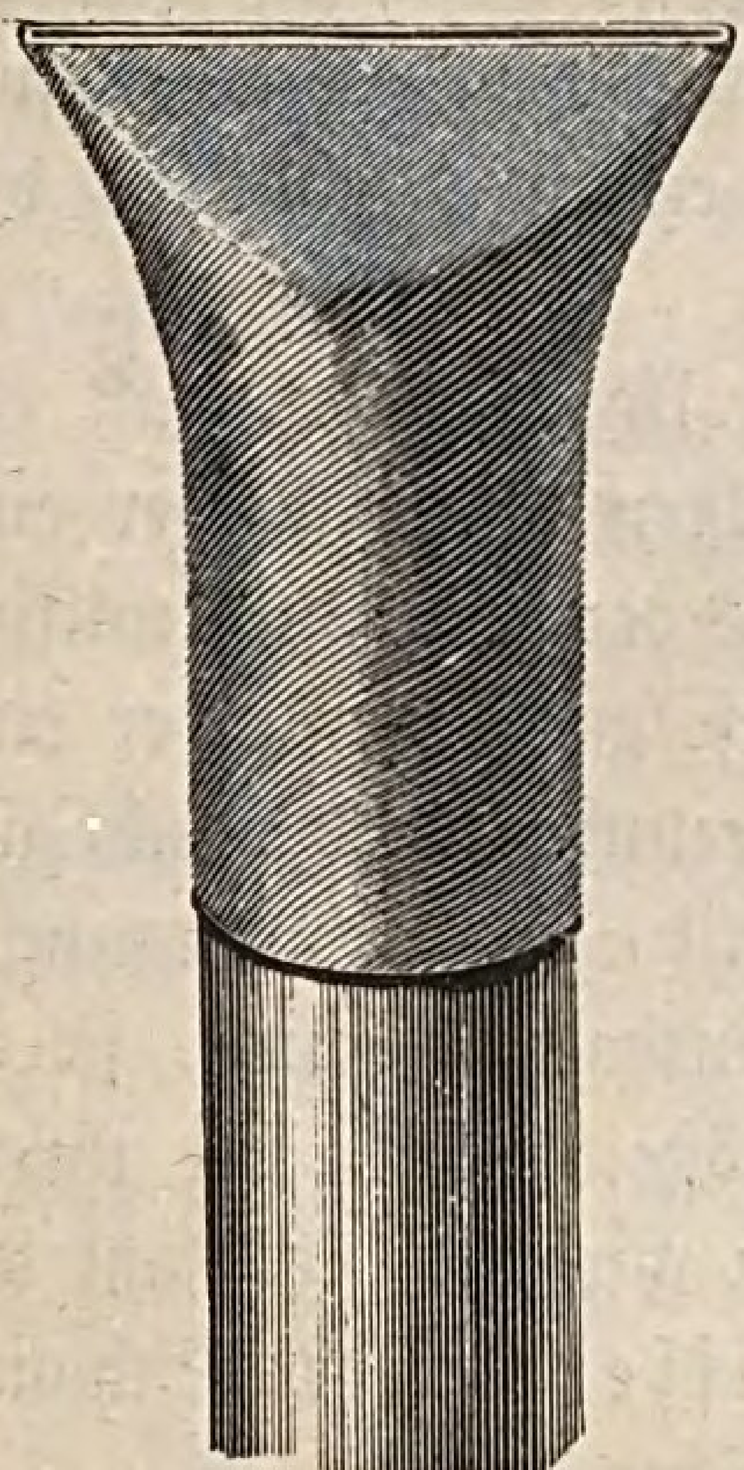
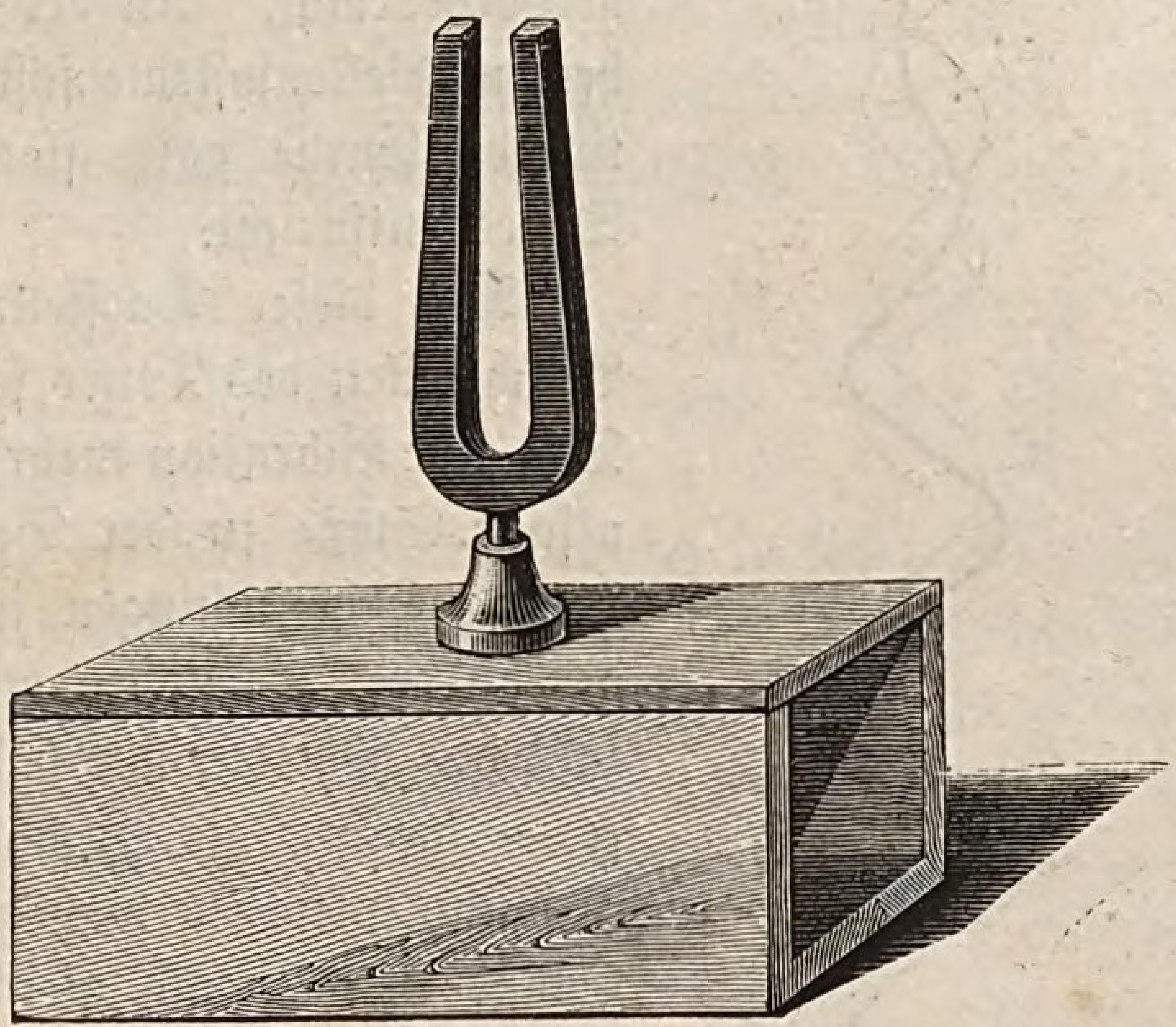


Fig. 237.



zwei Stimmgabeln, welche vollkommen unisono sind, neben einander gestellt, so braucht man nur die Zinken der einen mit etwas Wachs zu beschweren, um die Stöße sehr deutlich hörbar zu machen, wenn beide Stimmgabeln durch Anstreichen mit dem Violinbogen gleichzeitig zum Tönen gebracht werden.

Der Grund dieser Erscheinung ist leicht einzusehen. Wenn in einem bestimmten Zeitpunkt durch das Zusammenwirken beider Töne eine Verdichtung

hervorgebracht wird, so wird dieses Zusammenfallen bald aufhören, und nach einiger Zeit wird gleichzeitig mit einer Verdünnung des einen Tones eine Verdichtung des anderen eintreten. Wenn aber die Verdichtungen des einen Tones gerade mit denen des anderen zusammenfallen, so verstärken sie sich gegenseitig; sie heben sich aber gegenseitig auf, wenn die Verdichtungen des einen mit den Verdünnungen des anderen zusammentreffen.

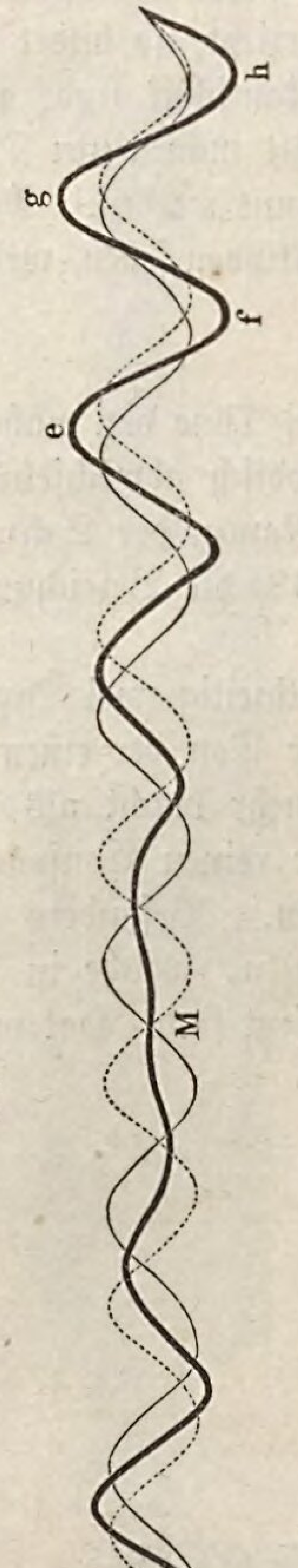


Fig. 238.

Das abwechselnde Anschwellen und Abnehmen des Tones, welches eintritt, wenn zwei nicht ganz isochrone Töne gleichzeitig erklingen, läßt sich am besten durch graphische Darstellung anschaulich machen. In Fig. 238 sollen die schwach gezogene und die punktirte Curve die Wellensysteme der beiden nicht isochronen Töne darstellen. Die Wellenberge entsprechen den Verdichtungen, die Thäler den Verdünnungen. Summirt man die Ordinaten der beiden Curven, so erhält man für jeden Moment die Intensität der Verdünnung oder Verdichtung, mit welcher beide Wellensysteme zusammen das Ohr afficiren; auf diese Weise ist die stark gezogene Curve construirt; bei a, b, c, d, e, f, g und h werden durch das Zusammenwirken beider Wellensysteme verstärkte Verdichtungen und Verdünnungen, also ein Anschwellen des Tones hervorgebracht. In der Nähe von M aber, wo sich die beiden Wellensysteme fast ganz aufheben, ist die resultirende Curve ganz flach, was einem Nachlassen des Tones entspricht.

Aus dieser Darstellung geht klar hervor, daß ein Anschwellen des Tones so oft erfolgen muß, als der eine Ton eine Vibration mehr macht als der andere; es müssen also x Stöße in der Secunde erfolgen, wenn der eine Ton x Schwingungen in der Secunde mehr macht als der andere. Bezeichnet man also mit a die Schwingungszahl des höheren, mit b die des niederen Tones, so ist $a - b = x$ die Anzahl der Stöße, welche bei ihrem Zusammenklingen wahrgenommen wird. Die Zahl der Stöße ist demnach gleich der Differenz der Schwingungszahlen der interferirenden Töne.

Je größer das Intervall der beiden zusammenklingenden Töne wird, desto mehr wächst die Zahl der in einer Secunde erzeugten Stöße, bis man sie endlich (wenn ihre Anzahl auf 10 und darüber hinausgewachsen ist) nicht mehr einzeln zu unterscheiden vermag; ihr Gesammteindruck bildet alsdann ein dem Ohre unangenehmes, rauhes Tongeräusch, welches die Ursache der Dissonanz zweier

Töne ist, deren Intervall einen halben oder einen ganzen Ton beträgt. So macht z. B. e_1 320, f_1 aber 341 Schwingungen in der Secunde, ihr Zusammenklingen veranlaßt also 21 Stöße in der Secunde. In den mittleren Tonlagen wird die Dissonanz am unangenehmsten, wenn die Zahl der Stöße bis auf 30 in der Secunde steigt.

Wächst das Intervall der beiden Töne noch mehr und klingen dieselben kräftig zusammen, so entsteht eine Reihe neuer Töne, welche man Combinationstöne nennt. Die Combinationstöne sind von Sorge (1703 bis 1778) im Jahre 1740 entdeckt worden und später durch Tartini, nach welchem man sie Tartini'sche Töne genannt hat, allgemeiner bekannt geworden.

Haben die ursprünglichen Töne eine gemeinschaftliche Erregungsstelle, so entstehen die Combinationstöne schon an dieser Stelle; sind aber die Erregungsstellen der ursprünglichen Töne getrennt, so entstehen die Combinationstöne erst in dem Gehörgange. Die Combinationstöne zerfallen nach Helmholtz in Differenztöne und in Summationstöne. Erstere Töne sind so benannt, weil ihre Schwingungszahl gleich der Differenz, letztere, weil ihre Schwingungszahl gleich der Summe beliebiger Vielfache der Schwingungszahlen der ursprünglichen Töne ist. Unter den Combinationstönen ist insbesondere derjenige Differenzton durch Stärke ausgezeichnet, dessen Schwingungszahl gleich der Differenz der einfachen Schwingungszahlen der ursprünglichen Töne ist; derselbe wird deshalb auch gewöhnlich als der Combinationston bezeichnet. Dieser Combinationston ist deutlich wahrzunehmen, wenn zwei Töne mit einfachem Intervall auf der Orgel, dem Harmonium oder der Violine kräftig angespielt werden, insbesondere aber, wenn eine Zungenpfeife, in der sich zwei ungleich gestimmte Zungen befinden, angeblasen wird. Folgende Tabelle giebt eine Zusammenstellung der ursprünglichen Töne mit ihren Combinationstönen:

Ursprüngliche Töne	c' c''	c' g'	c' f'	c' e'
Intervall derselben	1 : 2	2 : 3	3 : 4	4 : 5
Combinationston	c'	c	F	C

Hieraus ist ersichtlich, daß der Combinationston um so tiefer ist, je weniger die Töne in Bezug auf ihre Höhe verschieden sind. Die Combinationstöne werden nach Helmholtz daraus erklärt, daß bei großen Schwingungsweiten der Lufttheilchen die Beschleunigung der letzteren nicht nur von der ersten Potenz ihrer Entfernung aus der Gleichgewichtslage, sondern auch von dem Quadrate dieser Entfernung abhängt.

Mittheilung der Schallschwingungen zwischen festen, flüssigen und luftförmigen Körpern. 118 Wenn mehrere feste Körper unter einander zu einem Ganzen verbunden sind, so verbreitet sich die von einem Theile dieses Systems ausgehende Wellenbewegung über die ganze Masse; an der Gränze des Systems angekommen, gehen nun aber die Wellen nur theilweise in das angränzende Mittel, einen luftförmigen oder flüssigen Körper, über, theilweise aber werden sie reflectirt, so daß sich durch die Interferenz der

reflectirten Wellen mit den neu ankommenden in den einzelnen Theilen des festen Systems stehende Schwingungen bilden. Ein solches System bildet ein Ganzes, welches, wenn ein Punkt in Schwingungen versetzt wird, sich in einzelne schwingende Theile abtheilt, die durch Schwingungsknoten getrennt sind. Jeder einzelne Theil verliert gewissermaßen seine Individualität; seine Verbindung mit den benachbarten Stücken hindert ihn so zu schwingen, wie es geschehen würde, wenn er allein wäre.

Während sich die Schallwellen leicht über ein System von festen Körpern verbreiten, gehen sie nicht so leicht von einem festen Körper auf einen flüssigen und noch weniger leicht auf einen gasförmigen über; so kommt es denn, daß mancher ziemlich stark vibrirende feste Körper doch nur einen ganz schwachen Ton hören läßt, blos weil er seine Schwingungen der Luft nicht gehörig mittheilen kann. Dies ist z. B. bei der Stimmgabel der Fall, welche, stark angeschlagen und frei in der Luft gehalten, doch nur einen ganz schwachen Ton hören läßt.

Um den Ton eines solchen Körpers zu verstärken, muß man die Mittheilung seiner Schwingungen an die Luft durch Resonanz, d. h dadurch befördern, daß man die stehenden Schwingungen des tönenden Körpers noch auf einen anderen zu übertragen sucht. Ein Mittel dazu, welches darin besteht, die schwach tönenden, aber doch stark vibrirenden Körper vor eine Röhre von entsprechender Länge zu halten und so die Luftmasse in derselben zum Mittönen zu bringen, haben wir schon im §. 106 Seite 203 kennen gelernt.

Ein zweites Mittel, den Ton zu verstärken, besteht darin, den tönenden Körper mit einem anderen leicht in Schwingungen zu versetzenden Körper von verhältnißmäßig großer Oberfläche in Berührung zu bringen. Es bilden sich dann auf diesem, wie schon erwähnt wurde, ebenfalls stehende Schallschwingungen, und diese theilen sich, der großen Oberfläche des mittönenden oder resonirenden Körpers wegen, der Luft leichter mit. Setzt man z. B. die stark angeschlagene, aber in freier Luft schwach tönende Stimmgabel auf einen Kasten von dünnem, elastischem Holze, wie wir ihn in Fig. 237 kennen lernten, so hört man den Ton ungleich stärker. Darauf beruht die Anwendung des Resonanzbodens beim Monochord und bei verschiedenen musikalischen Instrumenten. Bei Flöten, Orgelpfeifen u. s. w. ist kein Resonanzboden nöthig, weil hier die stehenden Schwingungen einer Luftmasse den Ton geben, und diese sich ganz leicht der umgebenden Luft mittheilen.

So wie Schwingungen fester Körper Schallwellen in der Luft erzeugen, so können auch umgekehrt Schallwellen, die sich in der Luft verbreiten und einen festen Körper treffen, diesen zum Tönen bringen. So sieht man z. B. die Saite eines Instruments in Schwingungen gerathen, wenn sie von den Schallwellen des Tones, welchen sie selbst giebt, oder eines seiner harmonischen Töne getroffen wird; so zittern die Fensterscheiben heftig unter dem Einfluß gewisser Töne oder des Knalles einer Kanone. Diese Erscheinung, welche man so auffallend an leicht beweglichen Körpern wahrnimmt, findet auch bei größeren Massen und weniger elastischen Körpern Statt; alle Pfeiler und Mauern eines Domes erzittern mehr oder weniger beim Läuten der Glocken.

Drittes Capitel.

Die musikalischen Instrumente, das Stimm- und das Gehörorgan.

Die Blasinstrumente. Die Gesetze, welche wir in den beiden letzten 119
Capiteln kennen gelernt haben, kommen bei den verschiedenen musikalischen Instrumenten zur Anwendung; letztere lassen sich in zwei Hauptabtheilungen bringen, nämlich: 1) in Blasinstrumente, bei welchen der Ton durch einen Luftstrom erzeugt wird, und 2) in solche, bei welchen der Ton von den Schwingungen eines festen Körpers herrührt.

Die Blasinstrumente selbst zerfallen wieder in zwei Klassen. In die erste Klasse der Blasinstrumente gehören solche röhrenförmige Vorrichtungen, in welchen die eingeschlossene Luftsäule ganz nach den Gesetzen schwingt, welche wir in §. 106 und 107 kennen lernten, also die offenen und gedeckten Orgelpfeifen, das Flageolett und die Flöte. Auch die Syrinx oder die Pansflöte der Alten gehört in diese Klasse.

Während bei der Orgel jede Pfeife nur einen Ton giebt, wird bei der Flöte mit demselben Rohr die ganze Tonreihe der chromatischen Tonleiter dadurch erzeugt, daß man durch Oeffnen der entsprechenden Seitenlöcher die Länge der tönenden Luftsäule und die Lage der Schwingungsknoten verändert.

Die Blasinstrumente der zweiten Klasse sind diejenigen, welche mit Zungenwerken versehen sind, also z. B. die Mundharmonika, die Blasbalgharmonika (Physharmonika) und die Zungenwerke der Orgeln. Diese Instrumente sind mit einer harten Zunge versehen, und zwar haben die beiden erstgenannten kein Ansatzrohr, während der Schallbecher oder das Ansatzrohr der Orgelzungenwerke nur den Zweck hat, den Ton zu verstärken, ohne daß dadurch die Tonhöhe der Zunge wesentlich alterirt wird.

Ganz anders verhält es sich mit solchen Instrumenten, deren Zunge weich ist, d. h. aus einem sehr leicht beweglichen Material, meist aus dünnen Blättchen von italienischem Rohr, besteht und sich deshalb den Schwingungen der Luftsäule accommodirt, welche in dem Ansatzrohr zum Tönen gebracht wird.

Hierher gehört die Oboe, das Fagott, die Clarinette u. s. w. Das Mundstück der Clarinette wird durch ein vorn schneidenförmig verdünntes, aufschlagendes Rohrblatt gebildet, während das Mundstück des Fagottes und der Oboe aus zwei Rohrblättchen besteht, deren obere schwach gewölbte Enden eine feine Spalte bilden.

Bei der Posaune, dem Horn und der Trompete treten die Lippen des Bläsers an die Stelle der beiden Rohrblätter des Oboemundstücks. Das kessel- oder trichterförmige Mundstück des Instruments wird so gegen den Mund gepreßt, daß die vorderen häutigen Theile der Lippen nur noch einen engen Spalt für den Durchgang der Luft lassen. Die Ränder der Lippen gerathen beim Anblasen selbst in Oscillationen, durch welche ein stoßweises Hervorquellen der Anblaseluft bewirkt wird.

Das mehr oder weniger gebogene oder gewundene Rohr dieser Instrumente ist, den Schallbecher abgerechnet, sehr eng im Verhältniß zu seiner Länge, so daß es nie seinen Grundton, sondern nur eine Reihe von Obertönen desselben geben kann.

Bezeichnen wir die Schwingungszahl des Grundtones mit 1, so sind die Schwingungszahlen für seine Obertöne

2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 u. s. w.

Für ein dreifüßiges offenes Rohr ist der Grundton B, seine Obertöne sind also

$b, f_1, b_1, d_2, f_2, gis_2, b_2, c_3, d_3$ u. s. w.

Eine dreifüßige Trompete giebt aber als ihren tiefsten Ton f_1, also den zweiten Oberton, die Duodecime des ihrer Länge entsprechenden Grundtones. Auf diesen Ton folgen dann bei unveränderter Länge des Rohres, bei entsprechend verstärktem Anblasen die weiteren Töne b_1, d_2, f_2 u. s. w., welche den Namen der Naturtöne führen. Erst vom achten Oberton an befolgen dieselben die Tonreihe der diatonischen Tonleiter. Um die größeren Intervalle der tieferen Naturtöne auszufüllen und auch für diese tieferen Tonlagen die nöthigen Zwischentöne zu erhalten, hat man an diesen Instrumenten verschiedene Vorrichtungen (Züge, Klappen u. s. w.) angebracht, durch welche man die Länge des Rohres entsprechend abändern kann.

120 **Saiteninstrumente und tönende Platten.** Die Töne gespannter Saiten finden in der Musik eine ebenso vielfache als mannigfaltige Anwendung. Die Oberfläche der Saiten ist aber viel zu gering, als daß sie selbst bei den lebhaftesten Vibrationen kräftige Schallwellen in der Luft erzeugen könnten; es ist deshalb nöthig, die Vibrationen der Saite auf einen leicht beweglichen festen Körper von größerer Oberfläche zu übertragen, weshalb denn auch der Resonanzboden, wenn auch in sehr verschiedener Gestalt, bei allen Saiteninstrumenten in Anwendung gebracht wird.

Die wesentlichsten Unterschiede unter den Saiteninstrumenten sind durch die Art und Weise bedingt, wie die Saiten in Schwingungen versetzt werden;

bei dem Clavier geschieht dies durch Anschlag mit einem Hammer, bei der Guitarre und der Harfe durch Reißen mit den Fingern; bei der Violine, dem Violoncello und der Baßgeige geschieht es durch Streichen mit dem Bogen, weshalb diese letzteren Instrumente auch Streichinstrumente genannt werden.

Metallene Platten und Glocken haben für sich selbst schon eine hinlängliche Oberfläche, um kräftige Schallwellen in der Luft zu erzeugen. Als selbstständige musikalische Instrumente werden sie aber nicht gebraucht, während sie im Orchester verbunden mit anderen Instrumenten von trefflicher Wirkung sind.

Klangfarbe verschiedener musikalischer Instrumente. 121

Die Eigenthümlichkeit des Toncharakters, die Klangfarbe der verschiedenen Instrumente, ist dadurch bedingt, daß dieselben im Allgemeinen keine einfachen, sondern zusammengesetzte Töne oder Klänge geben in der Art, daß mit dem Grundton noch eine Reihe von Obertönen mitklingt. Der Toncharakter eines Instrumentes hängt nun davon ab, welche Obertöne vorhanden sind, und in welcher Stärke sie den Grundton begleiten.

Einfache Töne, also Klänge ohne Obertöne, werden am einfachsten hervorgebracht, wenn man eine angeschlagene Stimmgabel über eine Resonanzröhre von entsprechender Länge hält. Diese Töne sind ungemein weich und frei von allem Scharfen und Rauhen.

Die Klänge der Flöte stehen den einfachen Tönen sehr nahe, indem sie nur wenige und schwache Obertöne haben.

Weite gedeckte Pfeifen geben den Grundton fast ganz rein, engere lassen neben dem Grundton noch die Duodecime (Quinte der Octave) hören, weshalb sie auch Quintaten genannt werden.

Weite offene Orgelpfeifen lassen neben dem Grundton noch die Octave, engere lassen noch eine weitere Reihe von Obertönen hören, welche den Grundton kräftig begleiten und ihm einen schärferen, geigenähnlichen Charakter geben.

Die Obertöne gespannter Saiten hängen von der Substanz ab, aus welcher letztere gemacht sind, dann auch von der Art, wie sie zum Tönen gebracht werden. Bei guten Clavieren sind die Obertöne bis zum sechsten sehr stark, während der siebente und der neunte, deren Mitklingen die Harmonie der übrigen beeinträchtigt, ganz fehlen oder doch nur sehr schwach sein sollen. Bei Streichinstrumenten ist der Grundton verhältnißmäßig kräftiger als bei Clavieren, die ersten Obertöne sind schwächer, die höheren vom sechsten bis zum zehnten dagegen viel deutlicher und verursachen die Schärfe des Klanges der Streichinstrumente.

Geschlagene Metallstäbe und Metallplatten lassen neben dem Grundton eine Reihe sehr hoher unter sich unharmonischer Obertöne anhaltend und in gleichmäßigem Flusse mitklingen und dadurch ist jene Eigenthümlichkeit bedingt, welche man als metallische Klangfarbe, als Metallklang bezeichnet.

Durch das Hinzutreten der niederen, harmonischen Obertöne wird der Ton

klangvoller, reicher, prächtiger als der Ton einfacher Klänge, durch das Hinzutreten hoher Obertöne aber wird der Klang besonders durchdringend.

Ein musikalisch geübtes Ohr kann aus einem Klange die Einzeltöne wohl unterscheiden, welche den Grundton begleiten; um aber auch dem ungeübten Ohre sie hörbar zu machen, hat Helmholtz die Resonatoren construirt. Es sind dies gläserne oder messingene Hohlkugeln, Fig. 239, mit zwei einander gegenüberliegenden Oeffnungen, einer größeren zum Auffangen der Schallwellen und einer kleineren trichterartigen zum Einsetzen in das Ohr. Jeder Resonator ist auf einen besonderen Ton abgestimmt, dessen Höhe sich nach der Größe der Hohlkugel und der zum Auffangen der Schallwellen bestimmten Oeffnung richtet. Sobald dieser Ton, den man den Eigenton des Resonators nennt, in einem Klange enthalten ist, so wird derselbe durch Mittönen der abgestimmten Luftmasse verstärkt und wird von allen übrigen Tönen deutlich unterschieden. Statt der ursprünglich kugelförmigen ziemlich theuren Resonatoren wendet Schubring cylindrische Pappröhren von der in Fig. 240 dargestellten Form an. In den Boden, welcher die untere Oeffnung der Röhre schließt, ist ein Glasröhrchen eingesetzt, welches in den Gehörgang des einen Ohres gesteckt wird, während man das andere schließt. Das Röhrchen kann aber auch ganz wegbleiben, so daß man nur den Boden des Rohres mit der centralen kleinen Oeffnung auf die Ohrmuschel aufdrückt. Für alle Töne von c_1 an aufwärts sind die Röhren oben offen. Der Resonator für c_1 (256 Schwingungen) ist 33 cm lang und 6 cm weit, der für g_1 ist 21 cm lang und 4,6 cm weit u. s. w. Hält man nun den Resonator für g_1 an das eine Ohr, während das andere verstopft ist, so hört man den Ton g_1, wenn am Clavier der Ton C_{-1} oder c angeschlagen wird. In der Klangmasse, welche die C_{-1}- oder c-Saite giebt, ist also der Ton g_1 enthalten. Schlägt man D_{-1} oder d an, so hört man das g_1 nicht mit.

Fig. 239.

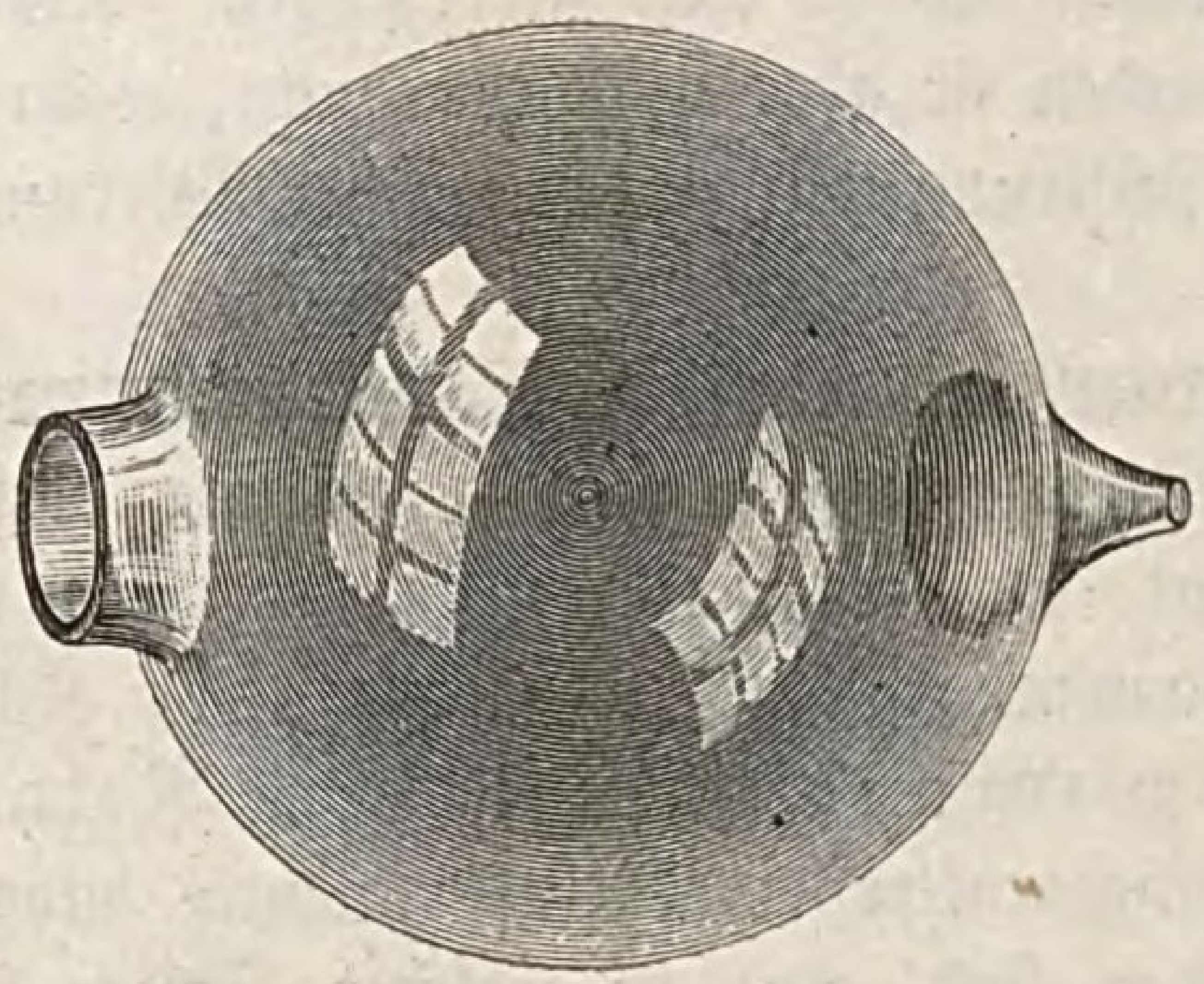
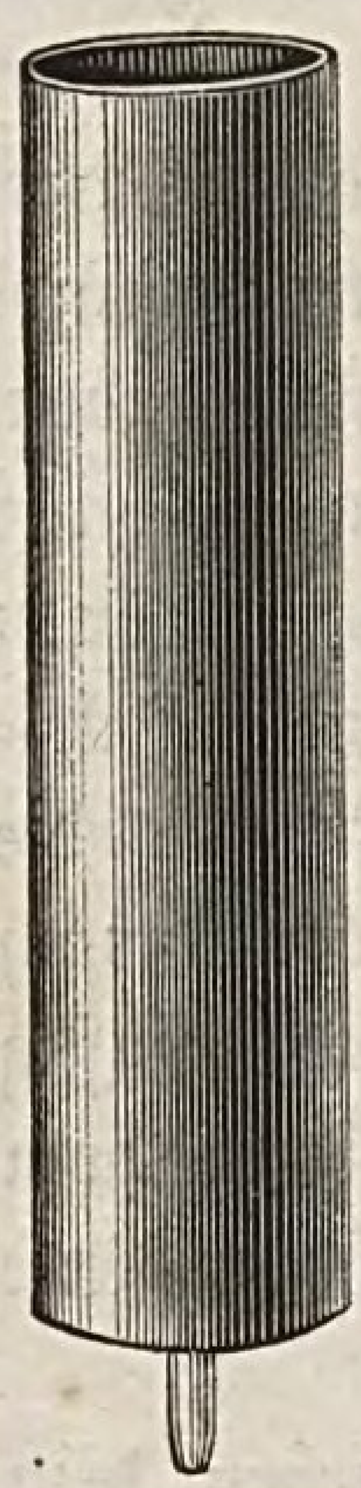


Fig. 240.



Für tiefere Töne würden die cylindrischen Resonatoren unbequeme Dimensionen annehmen, wenn sie oben offen blieben; sie werden kürzer, wenn man sie durch einen Deckel mit centraler Oeffnung schließt. Der Resonator für c ist 38,5 cm lang und 14 cm weit, während im Deckel, der ihn oben schließt, eine centrale Oeffnung von 4,5 cm Weite angebracht ist.

Appunn in Hanau verfertigt kegelförmige Resonatoren von Zinkblech.

Das Stimmorgan. Es ist bekannt, daß die Luftröhre oben mit dem Kehlkopfe und unten in der Lunge endigt; sie bildet den Weg, durch welchen die eingeathmete Luft der Lunge zugeführt und die verbrauchte wieder ausgeathmet wird. Am unteren Ende theilt sie sich in zwei Aeste, die Bronchien, welche sich dann weiter nach allen Seiten hin in das Gewebe der Lunge verzweigen. Das obere Ende der Luftröhre, der Kehlkopf, ist es, welcher das Stimmorgan bildet. 122

Der Kehlkopf besteht aus vier Knorpeln, welche erst im späteren Alter verknöchern, nämlich dem Ringknorpel, dem Schildknorpel und den beiden Gießkannenknorpeln. Diese Knorpel sind unter sich und mit dem oberen Ringe der Luftröhre verbunden und können durch verschiedene Muskeln auf das Mannigfaltigste bewegt werden. Die innere Wand des Kehlkopfes bildet eine Verlängerung der Luftröhre, die nach oben enger wird, bis zuletzt nur eine von vorn nach hinten gerichtete Spalte, die Stimmritze, übrig bleibt. Die Ränder der Stimmritze werden durch zwei Stimmbänder gebildet. Nach vorn hin sind beide Stimmbänder an dem Schildknorpel, am entgegengesetzten Ende aber ist das eine Stimmband an dem einen, das andere Stimmband an dem anderen Gießkannenknorpel angewachsen, so daß, je nachdem die Knorpel durch die entsprechenden Muskeln mehr von einander entfernt, oder einander genähert werden, die Stimmbänder mehr oder weniger gespannt sind und die Stimmritze enger oder weiter wird. Die Stimmbänder selbst bestehen aus einem sehr elastischen Gewebe.

Ueber den Lippen der Stimmritze befinden sich zwei sackartige Höhlungen, die eine auf der rechten, die andere auf der linken Seite; es sind dies die Ventriculi morgagni. Die oberen Ränder dieser Ventrikeln bilden einen zweiten, weiteren Spalt, welcher durch den Kehldeckel, eine fast dreieckige Haut oder vielmehr ein Knorpel, verdeckt werden kann; dieser Kehldeckel ist mit der einen Seite nach vorn hin angewachsen und verhindert, wenn er die Stimmritze verdeckt, daß Speisen und Getränke in die Luftröhre gerathen können, indem diese über den Kehldeckel hinweg in den Schlund gelangen.

Der Bau des Kehlkopfes wird durch die Figuren 241 bis 243 (a. f. S.) deutlicher werden. Fig. 241 stellt die vordere Hälfte des durch einen senkrechten Schnitt getheilten Kehlkopfes und zwar von hinten gesehen dar. Es ist

a der Durchschnitt durch den Ringknorpel,
b „ „ „ den Schildknorpel,
c „ „ „ die unteren Stimmbänder,
d „ „ „ die oberen Stimmbänder.

Zwischen den unteren und oberen Stimmbändern sieht man deutlich die Ventriculi morgagni. Ferner läßt sich aus der Figur ersehen, wie sich die Luftröhre gegen die unteren Stimmbänder hin verengt. Fig. 242 und Fig. 243 zeigen die unteren Stimmbänder von oben gesehen (und zwar nach Entfernung der oberen, welche keinen Ton geben). Fig. 242 zeigt die Stimmbänder in ungespanntem Zustande, bei welchem die Stimmritze weit geöffnet ist und keine

Tonbildung stattfindet, während die Fig. 243 die Stimmritze darstellt, wie sie sich bei Spannung der Stimmbänder gestaltet.

Dieser Beschreibung nach entspricht also der Bau des Kehlkopfs ganz dem der membranösen Zungenwerke, welche wir in §. 116 kennen lernten. Es sind die Vibrationen der unteren Stimmbänder, welche den Luftstrom aus der Luftröhre in bestimmten Intervallen hervorquellen lassen. Die Höhe des hervorgebrachten Tones hängt von der stärkeren oder schwächeren Spannung der Stimmbänder ab, zu deren Regulirung verschiedene Muskeln dienen.

Fig. 241.

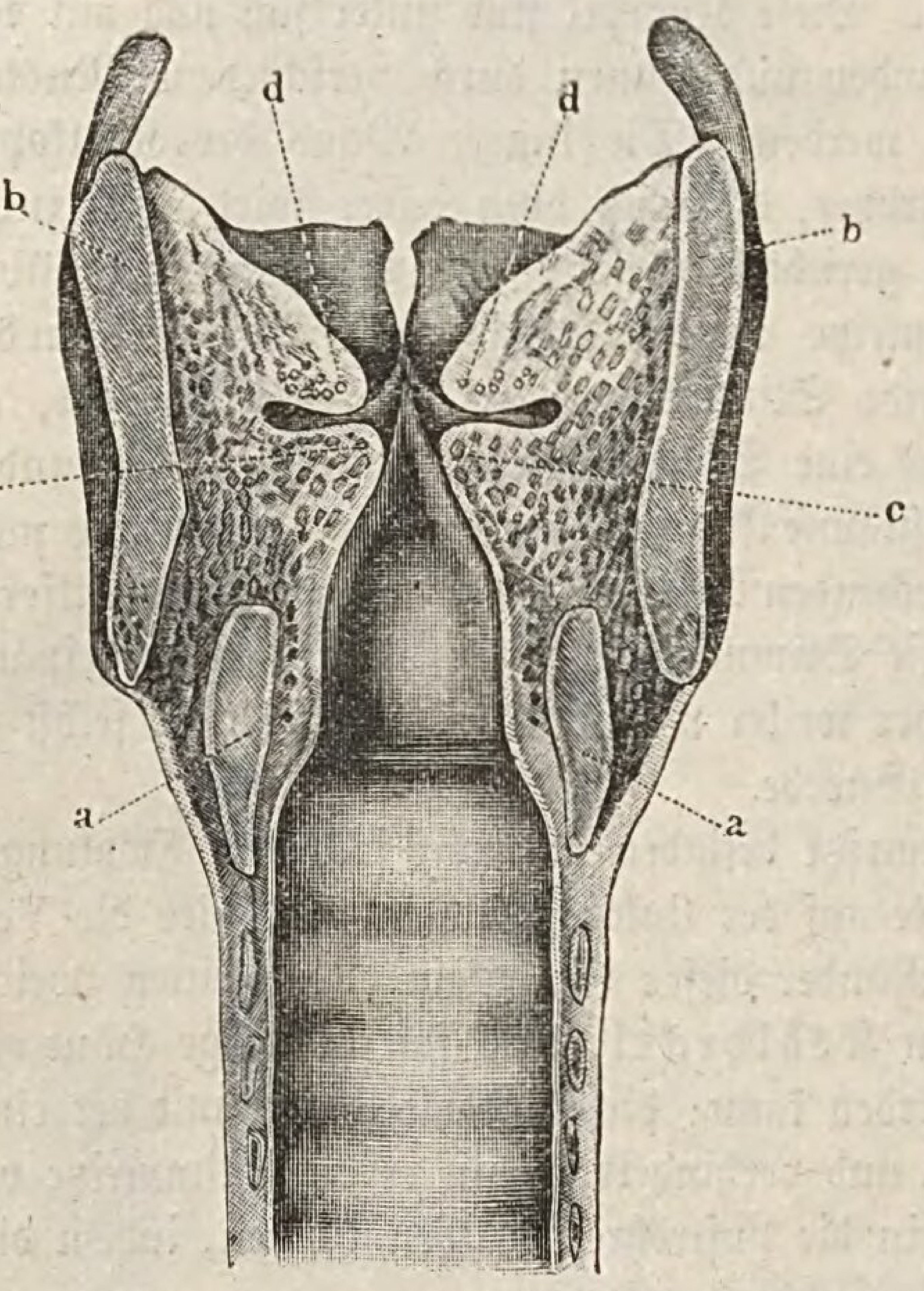


Fig. 242.

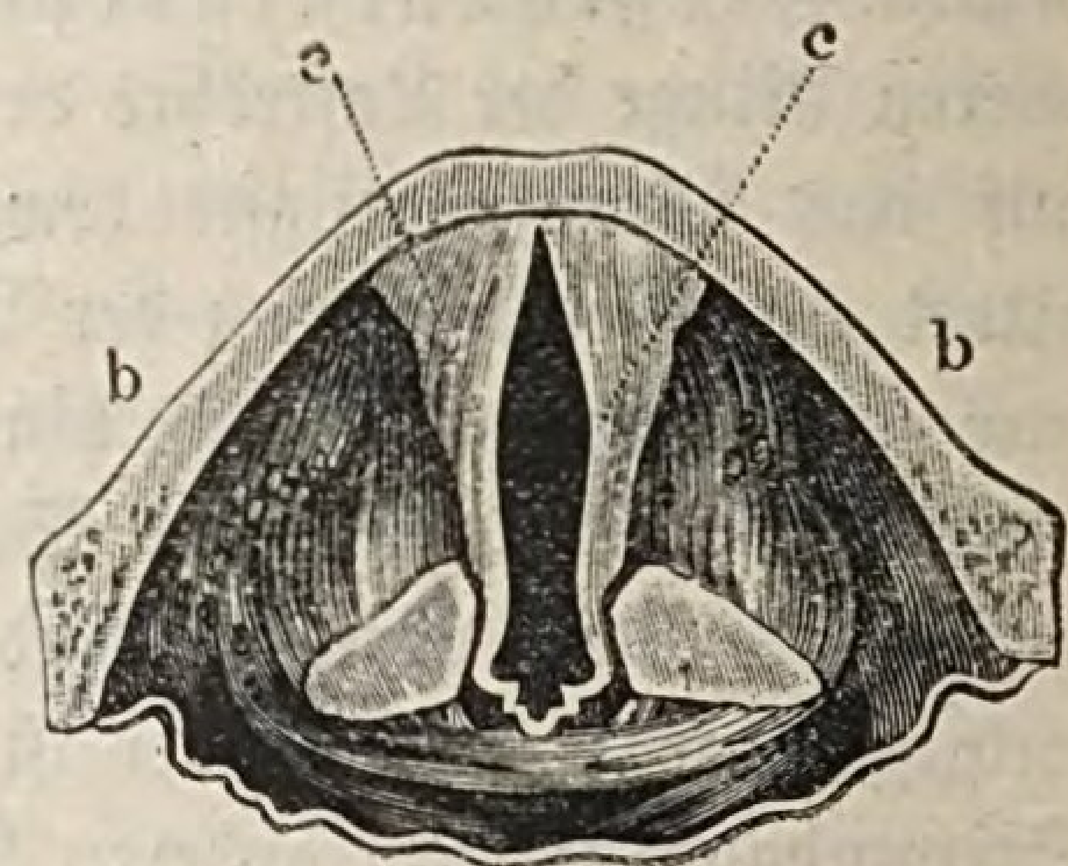
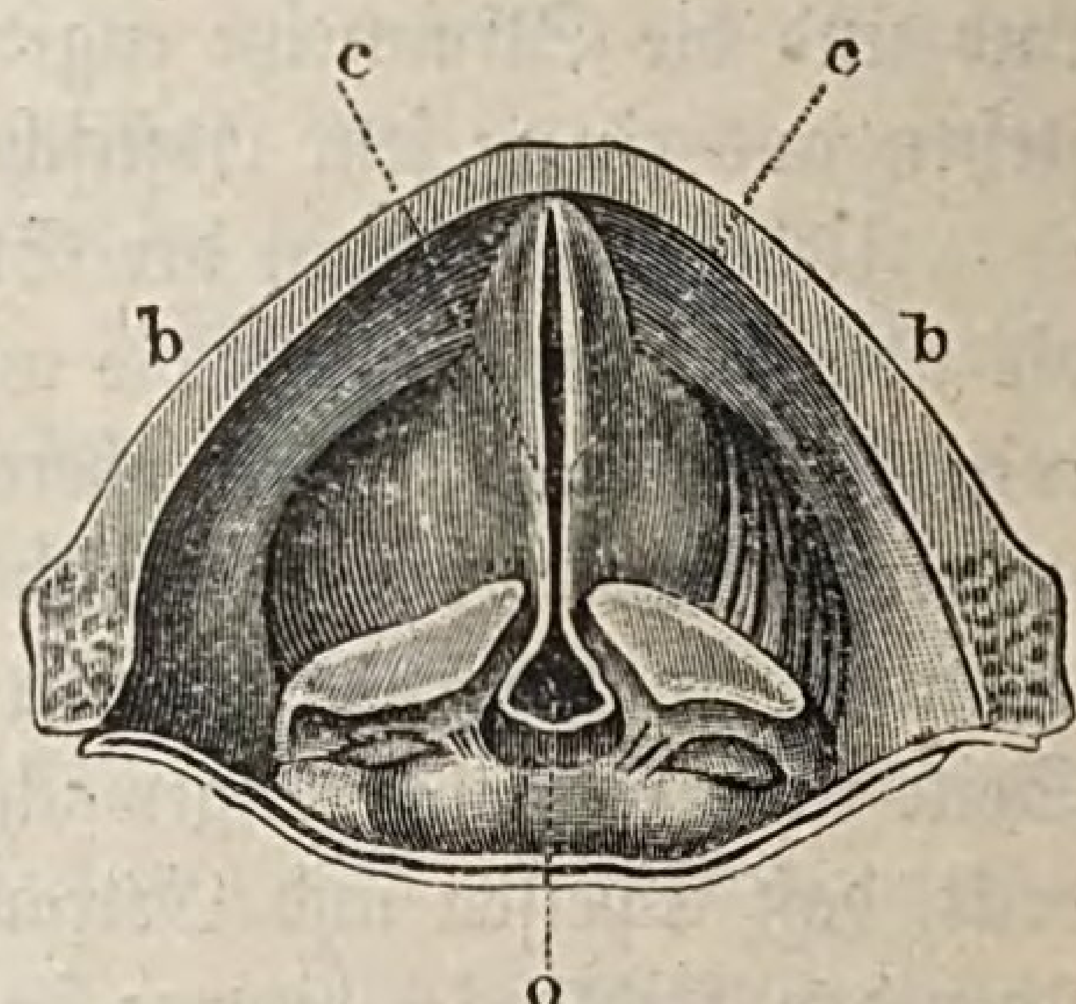


Fig. 243.



Die Consonanten der menschlichen Sprache bestehen in verschiedenen durch Lippen, Zähne und Zunge hervorgebrachten Geräuschen, welche den Vocaltönen vorausgehen, oder ihnen nachfolgen.

Die Verschiedenheit der Vocale ist dadurch bedingt, daß die Luftmasse in der Mundhöhle zum Mittönen kommt, und daß der Eigenton der Mundhöhle mit der veränderten Gestalt derselben variirt. Ist der Mund zur Hervorbringung des *U* gestaltet, so ist der Eigenton der Mundhöhle *f*; der Charakter des *U* besteht also darin, daß der vom Kehlkopf hervorgebrachte Ton stets von *f* begleitet ist. In gleicher Weise ist der Vocalcharakter des *O* durch das Mitklingen von b_1 und der des *A* durch das Mitklingen von b_2 bedingt.

Das *E* wird dadurch hervorgebracht, daß in der Mundhöhle f_1 und b_3, das *I* dadurch, daß *f* und d_4 mitklingt.

Die Geräusche, durch welche die Consonanten hervorgebracht werden, sind meist weniger intensiv als die Vocalklänge selbst und verschwinden deshalb in

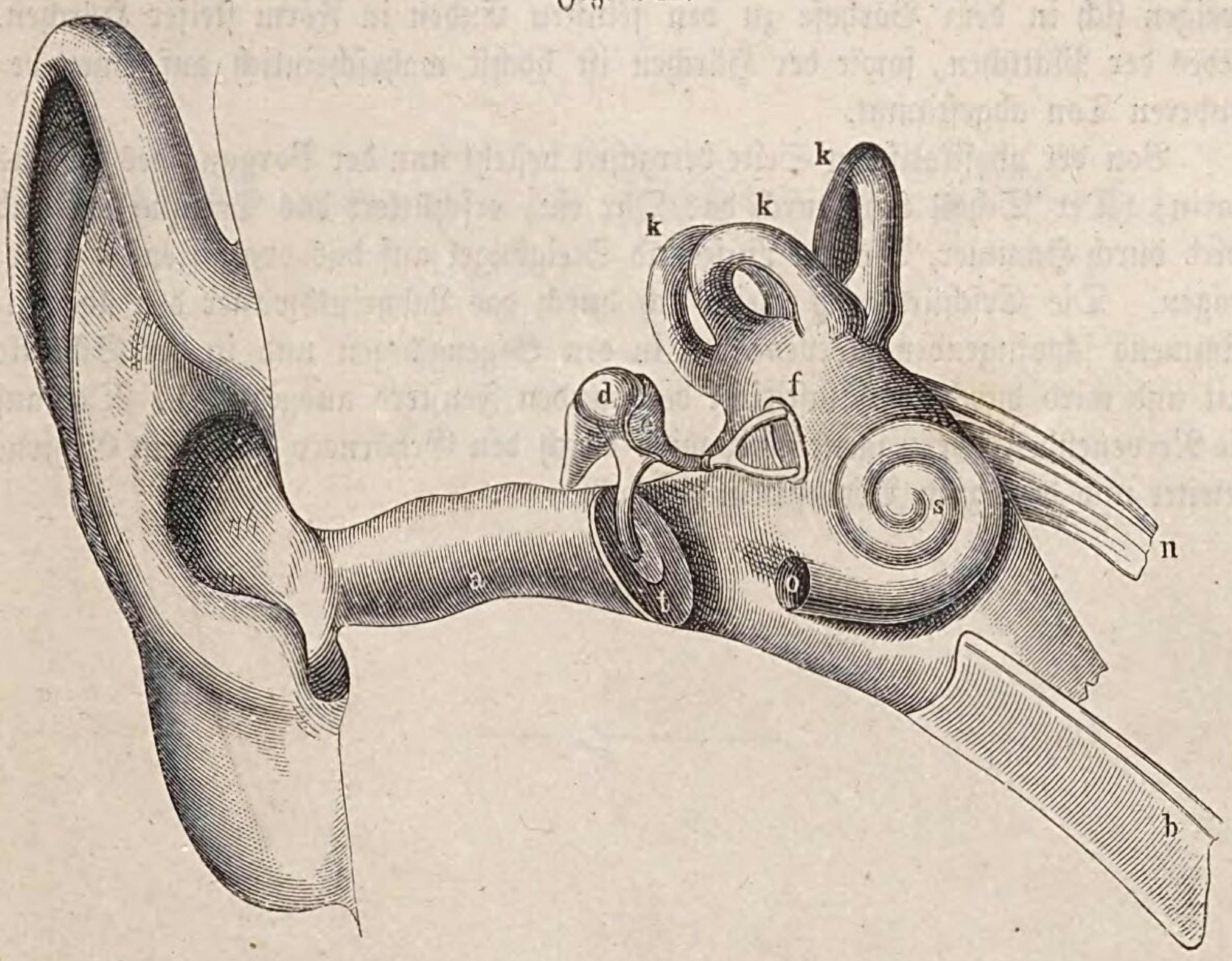
einiger Entfernung bereits vollständig, wenn man die Vocalklänge noch deutlich unterscheidbar hört. Es geht daraus auch hervor, daß man, um für etwas schwerhörige Personen verständlich zu reden, keineswegs lauter zu sprechen nöthig hat, sondern daß es genügt, die Consonanten schärfer hervorzuheben. Ueberhaupt wird die Verständlichkeit der Sprache nicht durch lautes Schreien, sondern durch sorgfältige Articulirung bedingt.

Das Gehörorgan. Das menschliche Gehörorgan (Fig. 244) umfaßt 123
drei getrennte Hohlräume, nämlich das äußere Ohr, die Paukenhöhle und das Labyrinth.

Das äußere Ohr beginnt mit der Ohrmuschel, verengt sich zu dem Gehörgang *a* und schließt mit einer dünnen, gespannten Haut, dem Trommelfell, ab.

Die Paukenhöhle ist eine Höhlung im Felsenbein zwischen Trommelfell und Labyrinth und enthält vier mit einander verbundene Knöchelchen,

Fig. 244.



welche nach ihrer Gestalt Hammer, Ambos, Linse und Steigbügel benannt werden. Der Hammer *d* ruht mit dem Stiele auf dem Trommelfell, mit dem Kopfe auf dem Ambos *c*; die Linse verbindet den Fortsatz des Amboses mit dem Steigbügel, dessen Fußplatte mit dem ovalen Fenster des Labyrinthes verwachsen ist. Von der Paukenhöhle führt außerdem ein Canal *b*, die Eustachische Röhre, nach dem Schlunde, wodurch die Luft zu beiden Seiten des Trommelfelles in gleicher Spannkraft erhalten wird.

Das Labyrinth bildet ein System von Canälen im Felsenbein, welche mit Wasser angefüllt sind, und besteht aus dem Vorhof mit den drei Bogengängen *k* und aus der Schnecke *s*. Der Vorhof ist rundlich ausgehöhlt; derselbe wird durch eine elliptisch geformte Haut, das ovale Fenster, von der Paukenhöhle getrennt und steht mit den Grundflächen der drei senkrecht zu einander gestellten halbkreisförmigen Bogengänge in Verbindung. Die Schnecke ist ein Canal von der Form eines $2^1/_2$mal gewundenen Schneckengehäuses und wird den Windungen entlang durch eine Scheidewand in die Vorhofstreppe und in die Paukentreppe getheilt. Das äußere Ende der Vorhofstreppe mündet in den Vorhof, während das äußere Ende der Paukentreppe von der Paukenhöhle durch ein rund geformtes Häutchen *o*, das runde Fenster, geschieden ist; beide Treppen stehen im Mittelpunkte der Windungen unter sich in Verbindung. Von der entgegengesetzten Seite der Paukenhöhle tritt der Gehörnerv *n* in das Labyrinth und verzweigt sich in vier Aeste. Der Hauptast dringt in die Schnecke und verbreitet sich vom Mittelpunkte nach dem Umfange in Tausenden von kleinen Plättchen; die drei anderen Aeste verzweigen sich in dem Vorhofe zu den feinsten Enden in Form steifer Härchen. Jedes der Plättchen, sowie der Härchen ist höchst wahrscheinlich auf einen besonderen Ton abgestimmt.

Von der physikalischen Seite betrachtet besteht nun der Vorgang des Hörens darin: Der Schall tritt durch das Ohr ein, erschüttert das Trommelfell und wird durch Hammer, Ambos, Linse und Steigbügel auf das ovale Fenster übertragen. Die Erschütterung theilt sich durch das Labyrinthwasser den übereinstimmend schwingenden Nervenenden in den Bogengängen und in der Schnecke mit und wird durch die Elasticität des runden Fensters ausgeglichen. Der auf die Nervenenden übertragene Reiz wird durch den Gehörnerv nach dem Gehirne geleitet und dort zum Bewußtsein gebracht.

Drittes Buch.

Optik oder die Lehre vom Licht.

Erstes Capitel.

Verbreitung des Lichtes.

Leuchtende und dunkle Körper. Alle leuchtenden Körper 124
bestehen ohne Ausnahme aus wägbarer Materie; der leere Raum kann wohl das Licht hindurchlassen oder fortpflanzen, aber nicht aussenden.

Alle Körper, welche nicht selbstleuchtend sind, theilt man in undurchsichtige Körper, wie Holz, Steine und Metalle; durchsichtige, wie Luft, Wasser und Glas, und durchscheinende, wie dünnes Papier und mattgeschliffenes Glas.

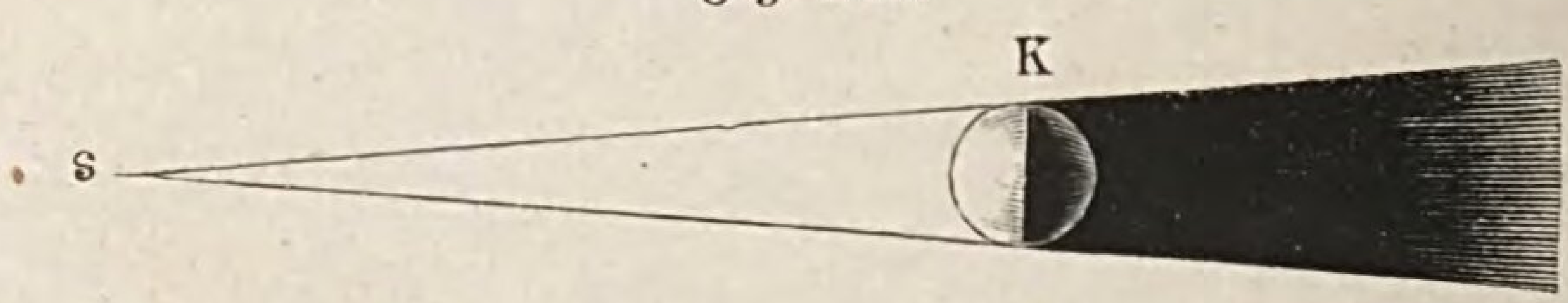
Das Licht pflanzt sich, so lange es in einem und demselben gleich dichten Mittel, also etwa in Luft von gleichmäßiger Dichtigkeit, oder in Wasser bleibt, in gerader Linie fort; jede Gerade, längs welcher die Fortpflanzung erfolgt, wird Lichtstrahl genannt. Wenn das Licht einen anderen Körper trifft, so wird es an dessen Oberfläche theilweise zurückgeworfen oder reflectirt, theilweise aber dringt es, wenn dieser Körper durchsichtig ist, mit veränderter Richtung in denselben ein, es wird gebrochen. Die Gesetze der Reflexion und der Brechung werden wir weiter unten näher betrachten.

Die Geschwindigkeit, mit welcher sich das Licht fortpflanzt, ist so groß, daß es alle irdischen Entfernungen in einem unmeßbar kleinen Zeittheilchen durchläuft. Durch Beobachtung der Verfinsterung der Jupiterstrabanten haben die Astronomen ermittelt, daß das Licht den Weg von der Sonne bis zur Erde in 8 Minuten und 13 Secunden, also 42 000 Meilen oder 300 000 km in einer Secunde zurücklegt (siehe Supplementband). Eine Kanonenkugel, welche 400 m in einer Secunde zurücklegt, würde, um von der Sonne zur Erde zu gelangen, ungefähr 12 Jahre brauchen.

Schatten und Halbschatten. Eine Folge der geradlinigen Fort- 125
pflanzung des Lichtes ist es, daß ein den Lichtstrahlen undurchsichtiger dunkler

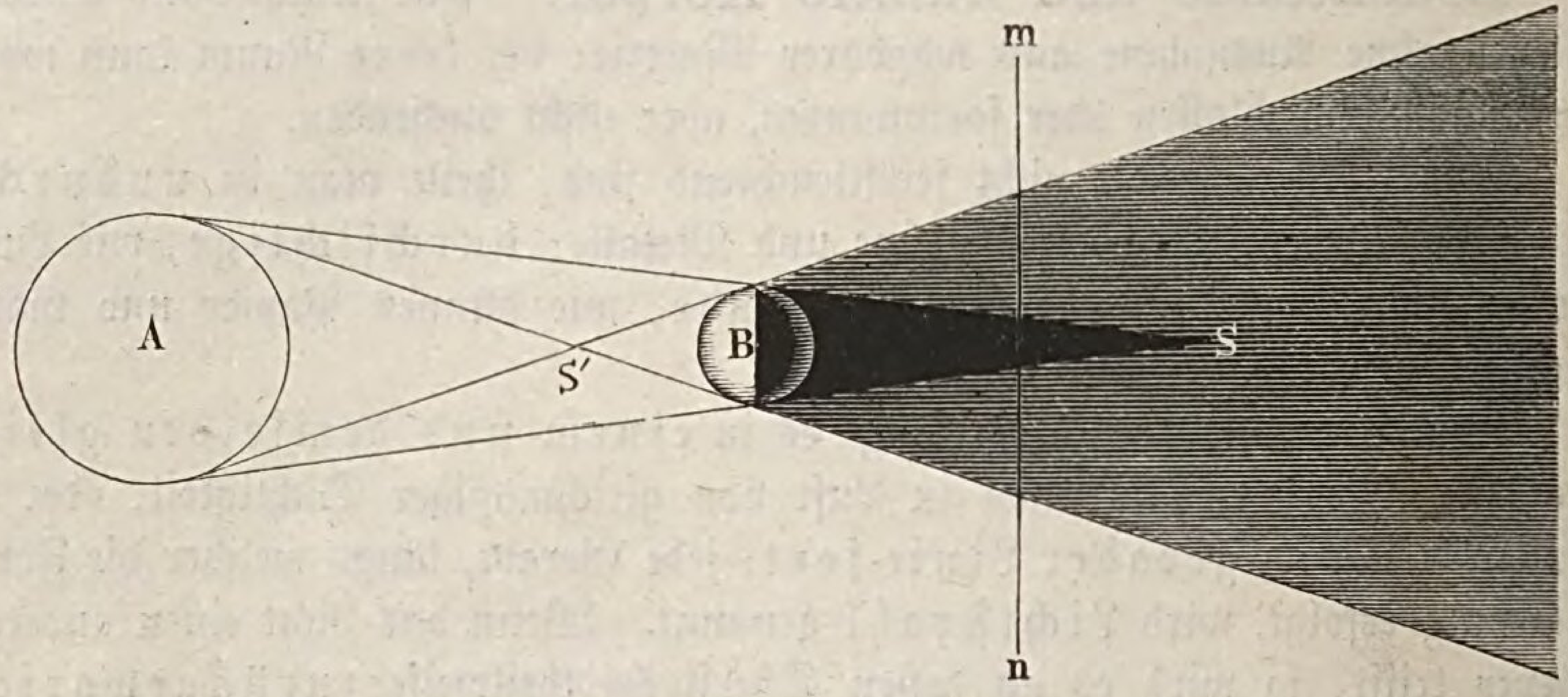
Körper einen Schatten wirft. Die Construction des Schattens ist leicht zu finden, wenn der Körper nur von einem einzigen leuchtenden Punkte aus erleuchtet wird. Die Gesammtheit aller Strahlen, welche von dem leuchtenden Punkte ausgehen und den dunklen Körper berühren, bildet eine Kegelfläche, und derjenige Theil derselben, welcher jenseits des dunklen Körpers liegt, bildet die Gränze des Schattens.

Fig. 245.



Wenn der leuchtende Körper eine namhafte Ausdehnung hat, so ist außer dem Schatten auch noch der Halbschatten zu unterscheiden. Der Schatten, der in diesem Falle auch der Kernschatten genannt wird, ist der Raum, welcher gar kein Licht empfängt, der Halbschatten hingegen ist derjenige Raum, welcher von einigen Punkten des leuchtenden Körpers Licht empfängt, von anderen aber nicht. Es sei z. B. *A*, Fig. 246, eine große leuchtende Kugel, *B* eine

Fig. 246.



kleinere undurchsichtige. Wie weit sich der Kernschatten, wie weit sich der Halbschatten erstreckt, ist aus der Figur deutlich zu ersehen. Durch einen Schirm in *mn* aufgefangen, würde der Schatten wie Fig. 247 aussehen. Der Durchmesser des Kernschattens nimmt in unserem angenommenen Fall mit der Entfernung vom leuchtenden Körper ab, der Durchmesser des Halbschattens aber nimmt zu.

Fig. 247.



Ganz nahe beim schattengebenden Körper ist der Kernschatten immer nur von einem schmalen Halbschatten umgeben; er ist deshalb hier auch ziemlich scharf begränzt. In größerer Entfernung vom schattengebenden Körper ist die Breite des Halbschattens bedeutender, der Uebergang vom Kernschatten zum vollen Lichte deshalb allmäliger, der Schatten erscheint nicht mehr scharf, sondern verwaschen. Jenseits des Punktes *S* hört der Kernschatten ganz auf, und der

an Breite immer zunehmende Halbschatten wird deshalb auch immer unbestimmter und schwächer.

Auf diese Weise erklärt es sich, daß der Schatten eines dem Sonnenlichte ausgesetzten Körpers, dicht hinter demselben aufgefangen, scharf begränzt, in größerer Entfernung hingegen ganz unbestimmt ist. So kann man z. B. nicht mehr mit Bestimmtheit den Punkt angeben, wo der Schatten der Spitze eines Thurmes auf dem Boden aufhört. Ein Haar, welches im Sonnenlichte dicht über ein Blatt Papier gehalten wird, wirft einen scharfen Schatten; hält man es aber nur 10 bis 15 cm hoch über das Papier, so ist wohl kaum noch ein Schatten wahrzunehmen.

Wenn man das von einem leuchtenden Punkte ausgehende Licht durch einen Schirm auffängt, in welchen eine ganz kleine Oeffnung gemacht ist, so wird das durch die Oeffnung durchgehende Licht einen scharf begränzten Strahlenkegel bilden; läßt man diese Strahlen auf einen zweiten Schirm fallen, so erhält man einen hellen Fleck auf dunklem Grunde. Auf diese Weise erhält man in einem ganz dunklen Zimmer auf einer Wand, welche einer feinen Oeffnung im Laden gegenübersteht, ein verkehrtes Bild der außerhalb befindlichen hellen Gegenstände, welche Lichtstrahlen durch diese Oeffnung ins Zimmer senden, wie dies Fig. 248 erläutert.

Fig. 248.

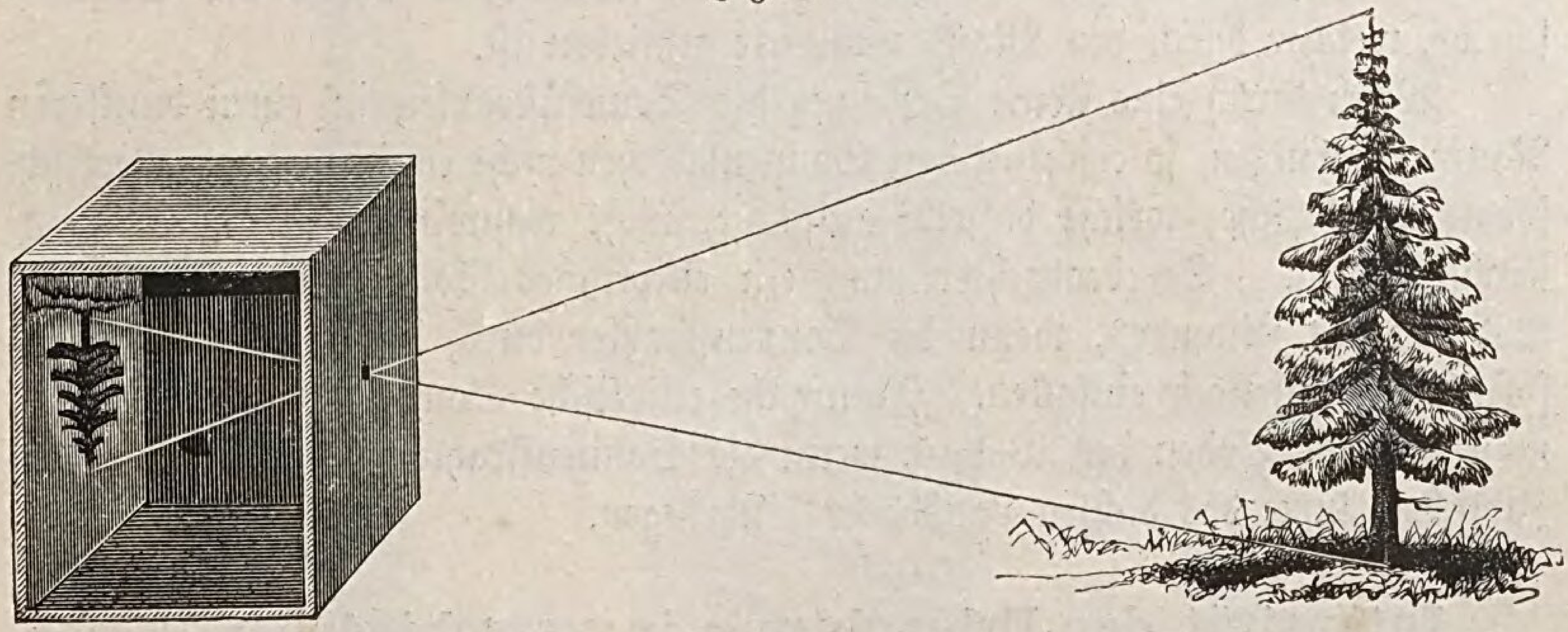


Fig. 249.



Wenn man die Sonnenstrahlen, welche von einem vor dem Fensterladen angebrachten Spiegel *P*, Fig. 249, in horizontaler Richtung reflectirt werden, durch eine kleine Oeffnung *o* in das verfinsterte Zimmer eintreten läßt, so erhält

man jederzeit auf der der Oeffnung gegenüberliegenden Wand ein rundes Sonnenbild, welches auch die Gestalt der Oeffnung selbst sein mag. Diese anfangs auffallend erscheinende Thatsache erklärt sich ganz einfach. Wenn die Sonne ein einziger leuchtender Punkt wäre, so würde auf der Wand, welche der Oeffnung gegenüberliegt, ein heller Fleck sich bilden, welcher genau die Gestalt der Oeffnung hat. Das vom höchsten Punkte der Sonnenscheibe ausgehende Licht wird vom Spiegel P aus in der Richtung on'' auf die Wand fallen, und bei n'' wird dadurch ein kleiner quadratischer Fleck entstehen, wenn die Oeffnung o selbst quadratisch ist. Der tiefste Punkt der Sonne veranlaßt ein viereckiges Bild bei n; der mittlere Punkt der Sonnenscheibe aber den eckigen Flecken n'. Das Bildchen l rührt von dem äußersten Punkte am rechten, r aber von dem äußersten Punkte am linken Sonnenrande her. Alle übrigen Punkte des Sonnenrandes geben viereckige Bilder, die auf den Umfang des Kreises $ln''rn$ fallen, während die übrigen Punkte der Sonne das Innere dieses Kreises erleuchten; die Gesammtheit aller der einzelnen quadratischen hellen Bildchen bildet mithin einen kreisförmigen hellen Fleck.

Wenn man den Versuch in der angegebenen Weise während einer partiellen Sonnenfinsterniß anstellt, so erscheint auf der Wand statt des vollkommen runden Sonnenbildes nur das Bild desjenigen Theils der Sonnenscheibe, welcher durch den Mond unbedeckt geblieben ist.

Wenn durch eine kleine Oeffnung die Sonnenstrahlen in einen dunkleren Raum eindringen, so erscheint das Sonnenbildchen nicht rund, sondern elliptisch, sobald die Fläche, welche dasselbe auffängt, nicht rechtwinklig zu den Sonnenstrahlen steht. So beobachtet man ein elliptisches Sonnenbildchen auf dem Boden eines Zimmers, wenn die Sonnenstrahlen durch das unregelmäßig geformte Schlüsselloch einfallen. Ebensolche elliptische Sonnenbildchen beobachtet man auf dem Boden des Waldes, wenn die Sonnenstrahlen durch die einzelnen Zwischenräume des dichten Laubdachs eindringen.

126 **Intensität der Erleuchtung in verschiedener Entfernung von der Lichtquelle.** Denken wir uns einen leuchtenden Punkt in der Mitte einer Hohlkugel, so wird die Oberfläche derselben alles von dem Punkte ausgehende Licht auffangen. Befände sich derselbe leuchtende Punkt in der Mitte einer Hohlkugel von einem 2-, 3mal so großen Halbmesser, so würden auch die Oberflächen dieser größeren Kugeln alles von dem leuchtenden Punkte ausgehende Licht auffangen. Nun aber lehrt uns die Geometrie, daß die Oberflächen der Kugeln sich verhalten wie die Quadrate ihrer Halbmesser. Wenn sich also derselbe leuchtende Punkt in der Mitte einer Kugel von 2-, 3mal so großem Halbmesser befindet, so muß sich dieselbe Lichtmenge über eine 4-, 9mal so große Oberfläche verbreiten, und es fällt daher auf die Flächeneinheit der Hohlkugel eine 4-, 9mal kleinere Lichtmenge. Die Lichtmenge, welche auf die Flächeneinheit trifft, bezeichnet man als Erleuchtungsintensität; daher ergiebt sich der Satz: die Intensität der Erleuchtung nimmt

in dem Verhältnisse ab, in welchem das Quadrat der Entfernung von der Lichtquelle wächst.

Um die Richtigkeit dieses Satzes durch den Versuch nachzuweisen, kann man sich des Apparats Fig. 250 bedienen, welcher in einem verfinsterten Zimmer aufgestellt wird. In der langen getheilten Rinne befindet sich ein Schieber *s*, welcher einen mit Papier überzogenen Rahmen trägt. In der Mitte des Papierschirmes ist ein kleiner mit Stearin gemachter Fettfleck angebracht.

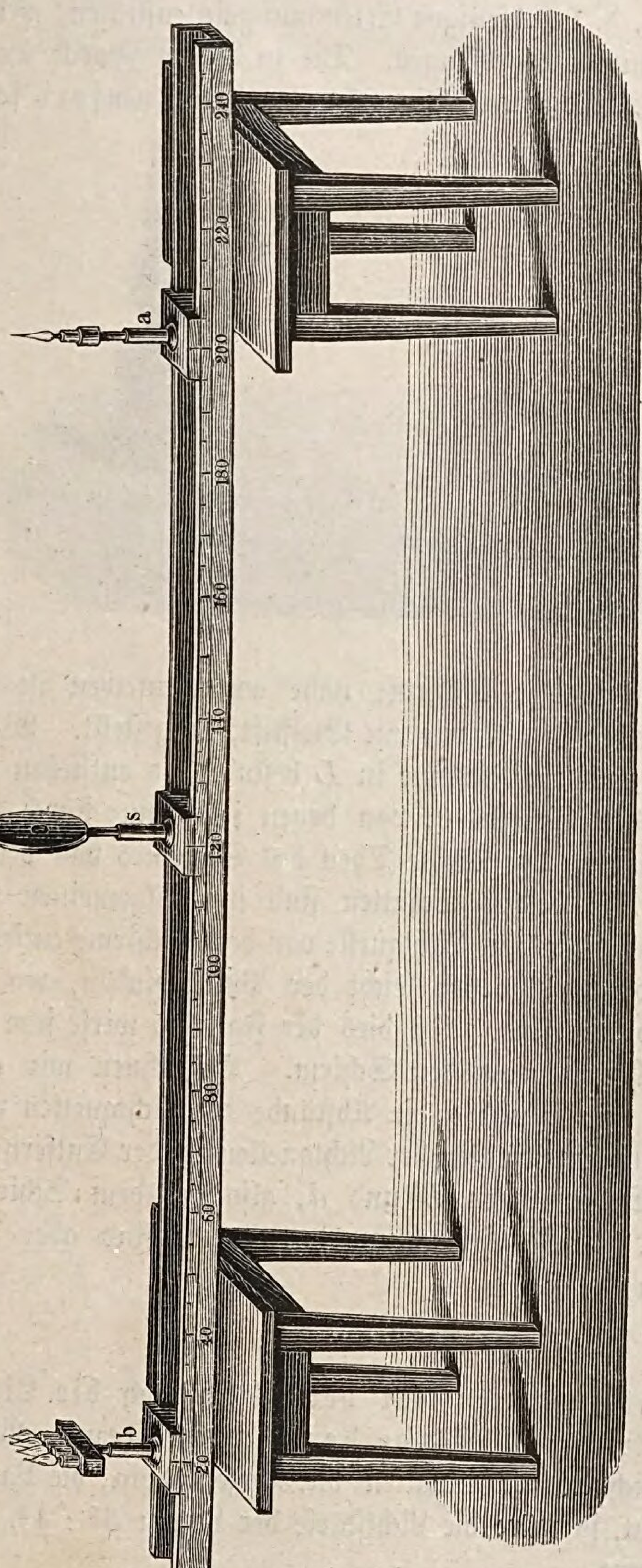


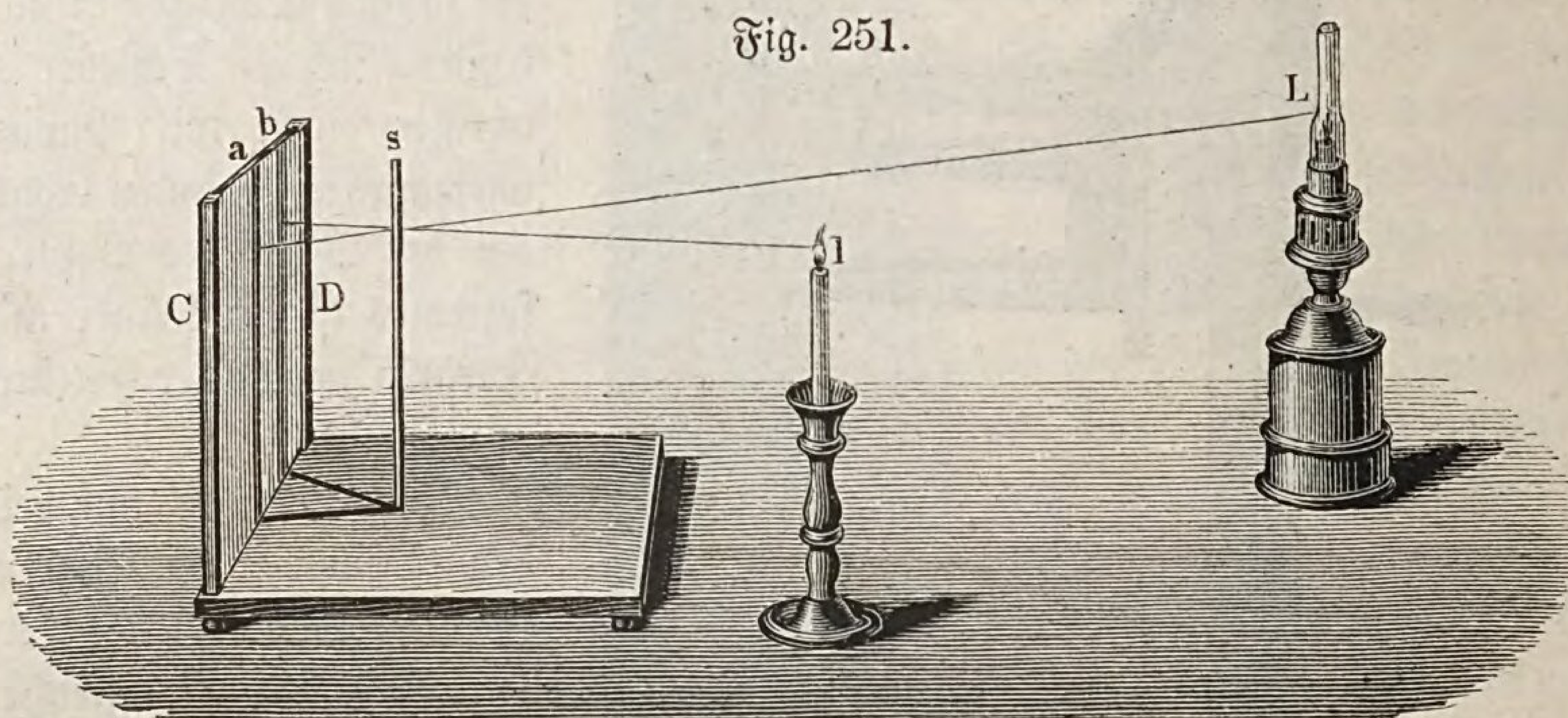
Fig. 250.

Nachdem man auf beiden Seiten vom Schirm zwei gleiche brennende Kerzen ungefähr in gleicher Entfernung von demselben, etwa 2 m, aufgestellt hat, kann man es durch Verschiebung des Schirms oder der einen Kerze leicht dahin bringen, daß von der einen, etwa von der rechten Seite her gesehen, der Fleck verschwindet, d. h. daß er weder hell auf dunklem, noch dunkel auf hellem Grunde erscheint. Bei dieser Stellung wird nun der Abstand des Schirms von der Kerze links gemessen, dann dieselbe entfernt und statt ihrer links vom Schirm ein Schieber mit 4 solchen Kerzenflammen aufgestellt. Man muß diese Flammen nun in die doppelte Entfernung vom Schirme bringen, wenn bei sonst unveränderten Umständen der Fleck abermals verschwin-

den soll. Demnach geben 4 Kerzen in der doppelten Entfernung ebenso hell als 1 Kerze in der einfachen Entfernung; 1 Kerze in der doppelten Entfernung giebt somit 4 mal weniger hell als in der einfachen.

Auf diesen Satz gründet sich nun auch die Vergleichung der Lichtstärken verschiedener Lichtquellen, d. i. derjenigen Erleuchtungsintensitäten, welche sie in der Einheit der Entfernung hervorbringen. Die zu diesem Zwecke angewandten Apparate nennt man Photometer. Fig. 251 stellt ein Rumford'sches

Fig. 251.



Photometer dar. *CD* ist ein weißer Schirm; nahe vor demselben ist ein undurchsichtiges Stäbchen *s*, etwa so dick wie ein Bleistift, aufgestellt. Wenn sich nun eine Kerze in *l*, eine andere Flamme in *L* befindet, so entstehen auf dem Schirme zwei Schatten des Stäbchens, von denen jeder nur durch eine Lichtquelle erleuchtet wird, während der übrige Theil des Schirmes von beiden Flammen Licht empfängt. Die beiden Schatten sind im Allgemeinen von ungleicher Dunkelheit; wenn aber die eine Lichtquelle von dem Schirme entfernt, oder demselben genähert wird, so läßt sich leicht der Punkt finden, wo die beiden Schatten gleichmäßig dunkel sind. Ist dies der Fall, so wirft jede der beiden Lichtquellen dieselbe Lichtmenge auf den Schirm. Bezeichnen wir nun mit *L* und *l* die Lichtstärken, mit *D* und *d* die Abstände der Lichtquellen vom Schirme, so sind die Erleuchtungsintensitäten der Lichtquellen in der Entfernung 1 gleich *L* und *l*, in den Entfernungen *D* und *d*, also auf dem Schirme, dagegen $L : D^2$ und $l : d'^2$. Diese Erleuchtungsintensitäten sind aber einander gleich, folglich hat man

$$L : D^2 = l : d^2 \text{ oder } L : l = D^2 : d^2,$$

d. h. bei gleicher Erleuchtungsintensität verhalten sich die Lichtstärken wie die Quadrate der Abstände der Lichtquellen. Wäre z. B. für den Fall der Gleichheit der Schatten die Kerze 60 cm, die Lampe 180 cm vom Schirme entfernt, so wäre die Lichtstärke der Lampe $3^2 : 1^2$, also 9 mal so groß als die der Kerze.

Bei dem Bunsen'schen Photometer wird zur Vergleichung der Intensität verschiedener Lichtquellen ein Papierschirm mit einem Fettfleck wie in Fig. 250

in Anwendung gebracht. Wenn man, bei unveränderter Beleuchtung der Rückseite des Papierschirms, auf der Vorderseite desselben die Normalkerze in der Entfernung d, die andere Lichtquelle aber in der Entfernung D aufstellen muß, um den Fettfleck unsichtbar zu machen, so ist $D^2 : d^2$ die Lichtstärke des letzteren, wenn man die Lichtstärke der Normalkerze zur Einheit nimmt. Als Normalkerze dient gewöhnlich eine Wachskerze, deren 6 auf ein Pfund gehen.

Zweites Capitel.

Katoptrik oder die Lehre von der Reflexion des Lichtes.

---

127 **Reflexion des Lichtes auf ebenen Flächen.** Wenn man durch eine kleine Oeffnung im Laden eines dunklen Zimmers ein Bündel Sonnenstrahlen in dasselbe eintreten läßt und dieselben auf einem ebenen Spiegel (einer wohl polirten ebenen Metallfläche oder einem belegten Glasspiegel) auffängt, so beobachtet man im Allgemeinen folgende Erscheinungen: 1) Von dem Spiegelchen scheint in einer bestimmten Richtung ein Strahlenbündel herzukommen, welches auf der Wand, die es trifft, gerade so ein kleines Sonnenbildchen erzeugt, wie wenn die direct einfallenden Sonnenstrahlen diese Stelle getroffen hätten; solche Strahlen heißen regelmäßig reflectirt; ihre Lichtstärke ist um so bedeutender, je vollkommener der Spiegel polirt ist. 2) Von den verschiedenen Orten des dunkeln Zimmers aus kann man auf der Spiegelfläche selbst ein Sonnenbildchen unterscheiden; es rührt dies daher, daß von der getroffenen Stelle des Spiegels ein Theil des einfallenden Lichtes unregelmäßig reflectirt, d. i. nach allen Seiten hin zerstreut oder diffundirt wird.

Das letztere, auf der Spiegelfläche selbst wahrnehmbare Sonnenbild ist um so lichtschwächer, je besser der Spiegel polirt ist; auf sehr guten Spiegelflächen kann man kaum eine Spur desselben wahrnehmen, während die Stelle der Wand, auf welche die reflectirten Strahlen auffallen, fast ganz so hell erscheint, als wäre sie direct von den Sonnenstrahlen getroffen worden.

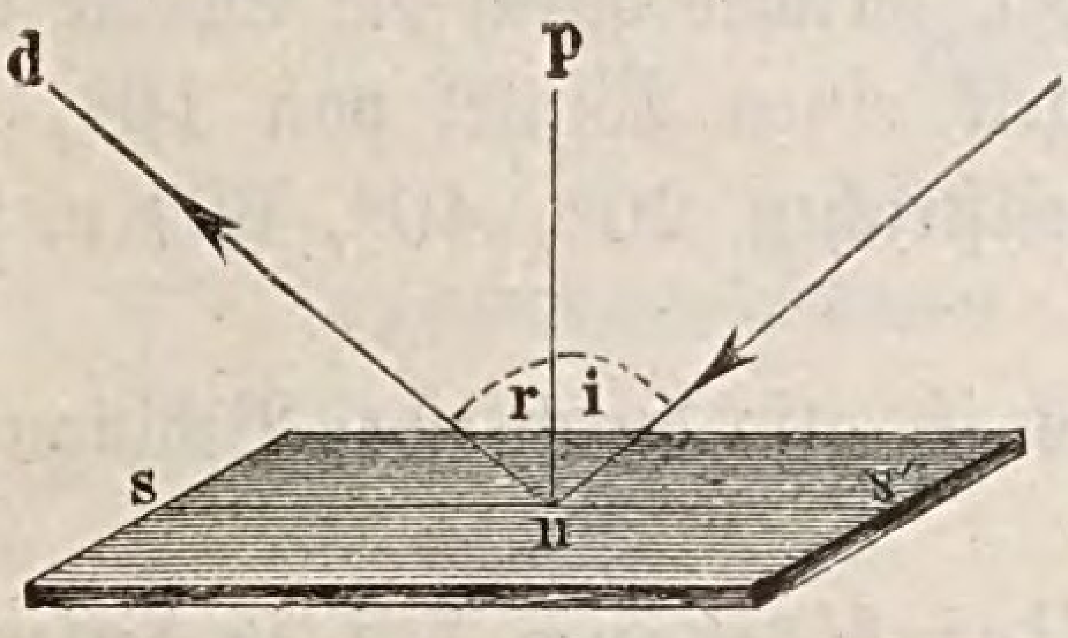
Wird nun der wohl polirte Spiegel durch einen etwas matteren ersetzt, so erscheint das reflectirte Sonnenbildchen viel schwächer, während das Sonnenbildchen auf der Spiegelfläche selbst um so deutlicher sichtbar wird, je unvollkommener ihre Politur ist. Wenn man endlich an die Stelle der etwas matten Spiegelfläche ein Blatt weißen Papieres bringt, so verschwindet das reflectirte

Bild vollständig, während das Sonnenbildchen auf der Papierfläche sehr hell erscheint, weil alle sie treffenden Sonnenstrahlen unregelmäßig zerstreut werden.

Die meisten Gegenstände unserer Umgebung haben rauhe, nicht spiegelnde Oberflächen, so daß sie die auffallenden Lichtstrahlen nach allen Seiten hin unregelmäßig zerstreuen; eben durch dieses unregelmäßig zerstreute Licht werden sie uns von allen Seiten her sichtbar. — Bei einem sehr gut polirten Spiegel bemerken wir kaum die spiegelnde Ebene, welche sich zwischen uns und den Bildern befindet, die er uns zeigt.

Betrachten wir nun die Gesetze, nach welchen die regelmäßige Reflexion auf vollkommen glänzenden Oberflächen stattfindet.

Fig. 252.



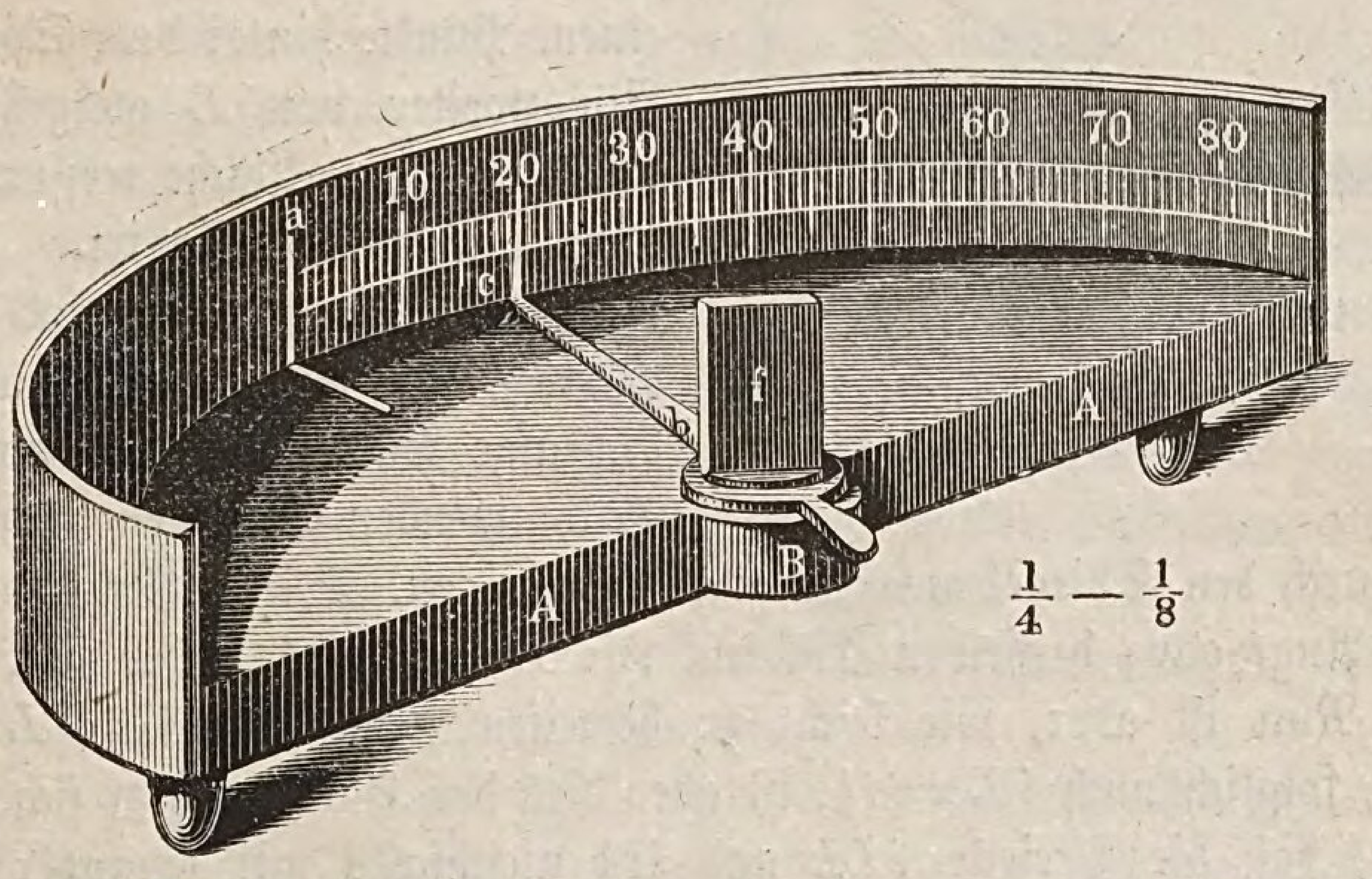
In Fig. 252 sei ss' die Oberfläche eines Spiegels; ein Lichtstrahl fn, welcher den Spiegel in n trifft, wird nach einer Richtung nd reflectirt, welche in der Ebene liegt, die man sich durch den einfallenden Strahl fn rechtwinklig auf die Spiegelebene gelegt denken kann.

Diese rechtwinklig auf der Spiegelebene stehende Ebene, welche den einfallenden und den reflectirten Strahl enthält, wird die Reflexionsebene oder auch die Einfallsebene genannt.

Denken wir uns in n ein Perpendikel np auf die Spiegelebene errichtet, so heißt dieses Perpendikel das Einfallsloth. Der Winkel i, welchen der einfallende Strahl mit dem Einfallslothe macht, heißt der Einfallswinkel, der Winkel r, welchen der reflectirte Strahl mit dem Einfallslothe macht, heißt der Reflexionswinkel.

Der Reflexionswinkel ist jederzeit dem Einfallswinkel gleich.

Fig. 253.



Dieser wichtige Satz läßt sich mit Hülfe des Apparats Fig. 253 (a. v. S.) leicht nachweisen. Der Spiegel *f*, welchen unsere Figur von der Rückseite zeigt, ist um eine verticale Axe drehbar, die durch den Mittelpunkt des horizontalen halbkreisförmigen Brettes *A* geht. Die Richtung des Einfallslothes für ein von *a* in horizontaler Richtung auf den Spiegel fallendes Strahlenbündel ist durch den Messingstreifen *bc* bezeichnet, welcher sich mit dem Spiegel dreht und bei *c* einen verticalen Zeiger trägt.

Um den gekrümmten Theil des Brettes *A* ist ein dasselbe überragender Halbkreis von Messingblech gelegt, welcher bei *a* eine verticale Spalte hat. Der Viertelkreis von *a* nach der rechten Seite ist in 90 Grad getheilt.

Ist der Spiegel so gestellt, daß der Zeiger *c* auf den Theilstrich 10^0, 20^0, 30^0 u. s. w. zeigt, so wird ein Strahlenbündel, welches durch die Spalte bei *a* eindringt, mit dem Einfallslothe des Spiegels einen Winkel von 10^0, 20^0, 30^0 u. s. w. bilden und also nach den Theilstrichen 20^0, 40^0, 60^0 u. s. w. reflectirt werden.

Die Richtung des reflectirten Strahles ist also durch zwei Bedingungen bestimmt, nämlich:

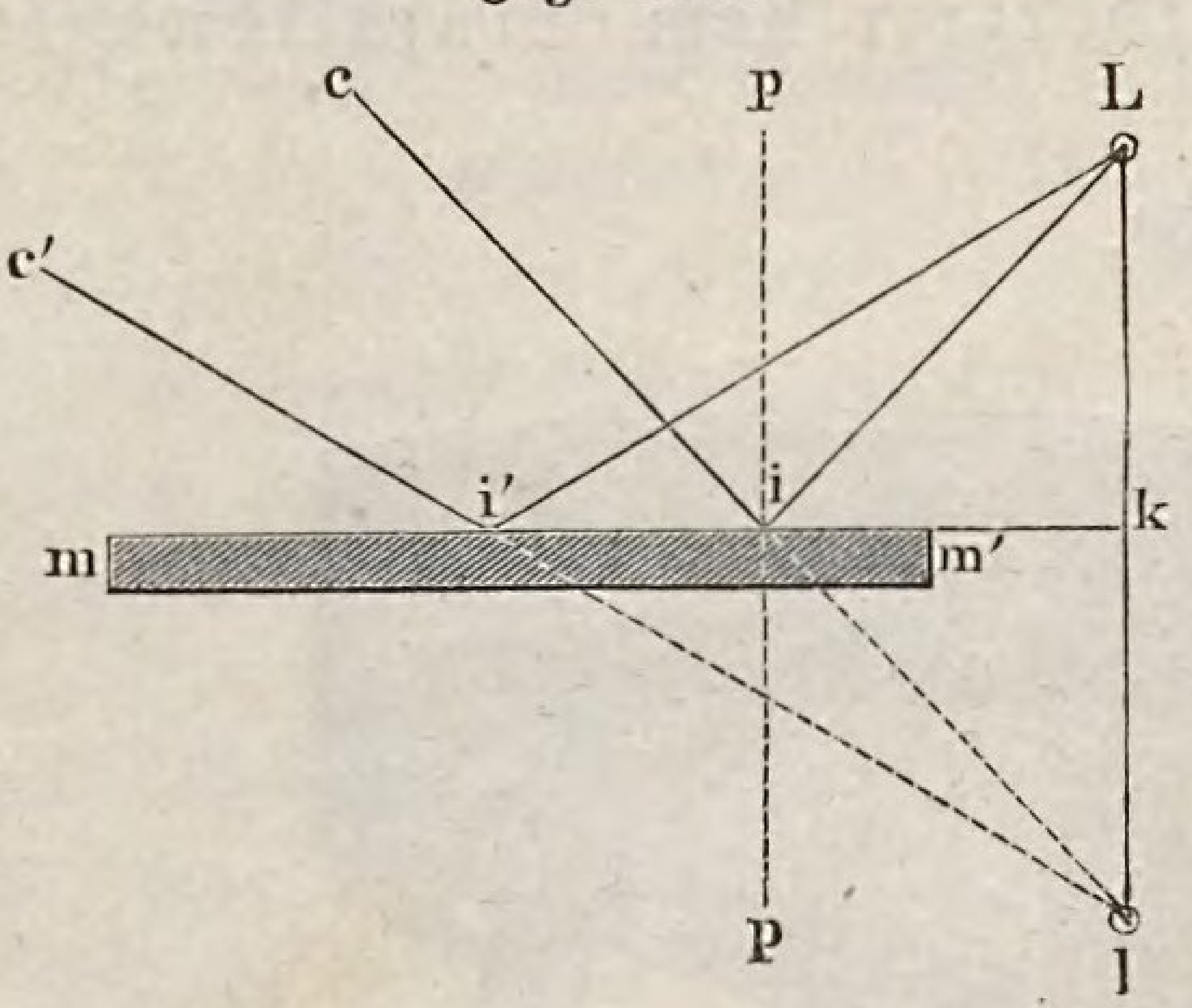
1) daß der reflectirte Strahl in der Einfallsebene, d. i. in derjenigen Ebene liegt, welche durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth gelegt werden kann, und

2) daß der Reflexionswinkel dem Einfallswinkel gleich ist.

Mit Hülfe dieser beiden Sätze kann man leicht zeigen, daß ein ebener Spiegel von Gegenständen, die sich vor seiner Ebene befinden, Bilder zeigen muß, welche mit den Gegenständen in Beziehung auf die spiegelnde Ebene symmetrisch sind.

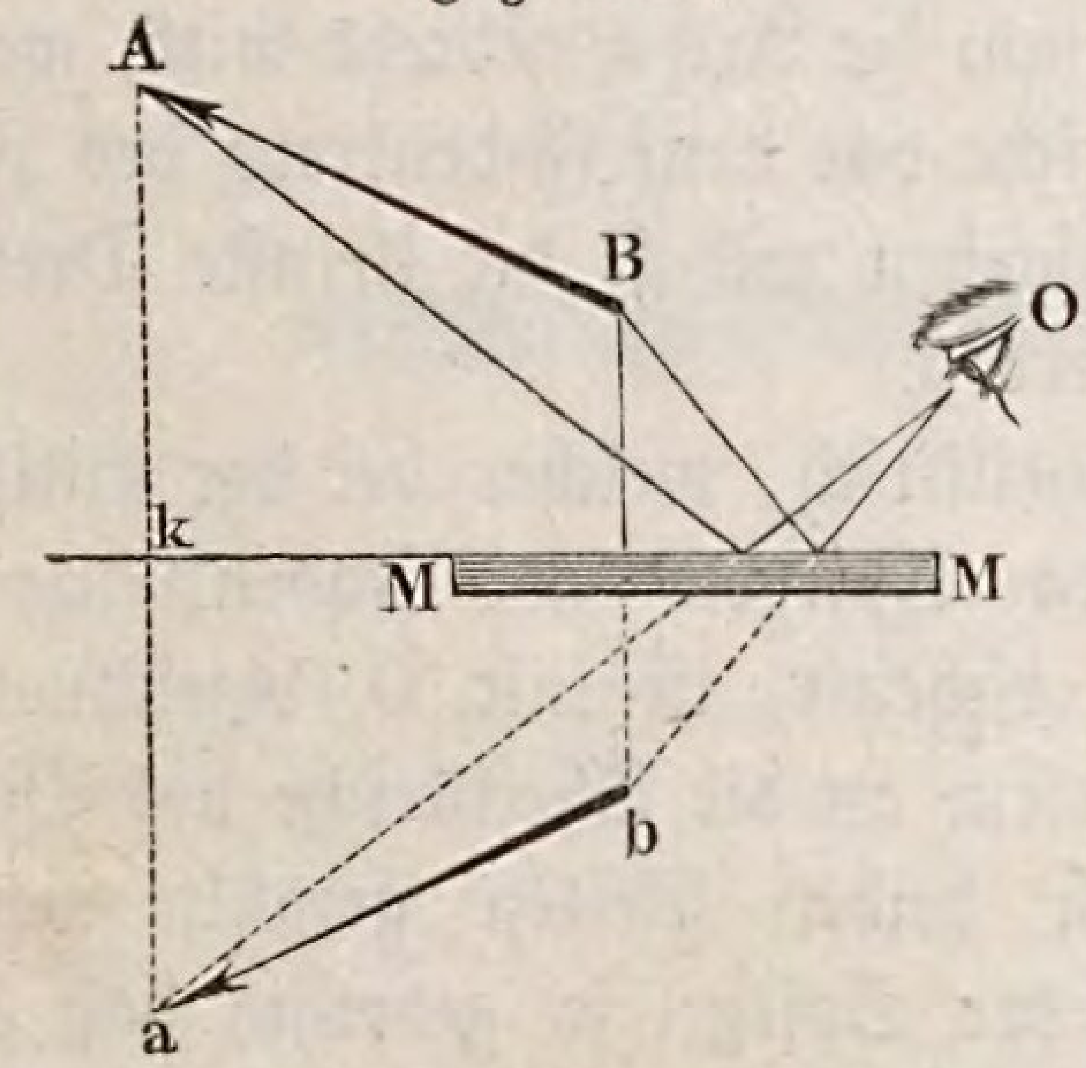
Es sei *m'm*, Fig. 254, ein ebener Spiegel, *L* ein leuchtender Punkt vor demselben, der einen Strahl *Li* auf den Spiegel sendet. Dieser Strahl wird nun nach den bekannten Gesetzen in der Richtung *ic* reflectirt, und macht, wenn er das Auge trifft, auf dasselbe denselben Eindruck, als ob er von einem Punkte hinter dem Spiegel käme. Ein zweiter von *L* ausgehender und in *i'* die Spiegelfläche treffender Strahl wird nach *i'c'* reflectirt. Verlängert man die Strahlen *ci* und *c'i'* rückwärts, so ist ihr Durchschnittspunkt *l* derjenige Punkt, von welchem alle von *L* kommenden Strahlen nach ihrer Reflexion durch den Spiegel *mm'* auszugehen scheinen. Dieser Punkt macht somit auf das Auge ganz denselben Eindruck wie *L* und wird daher sein Bild genannt. Nun ist aber, wie leicht zu beweisen, das Dreieck *ii'L* congruent mit *ii'l*, folglich auch $iL = il$; ist aber dies der Fall, so läßt sich auch leicht beweisen, daß die Dreiecke *iLk* und *ilk* gleichfalls mit einander congruent

Fig. 254.



sind, woraus dann weiter folgt, daß Winkel ikl gleich ist dem Winkel ikL, daß somit die Linie Ll rechtwinklig auf der Spiegelebene mm' steht und endlich, daß $kL = kl$ ist. Um also das Bild eines leuchtenden Punktes in einem ebenen Spiegel zu finden, hat man nur von dem leuchtenden Punkte ein Perpendikel auf den Spiegel oder seine Verlängerung zu fällen und dasselbe hinter der Spiegelebene um eben so viel zu verlängern, als der leuchtende Punkt vor dem Spiegel liegt.

Fig. 255.



Da dies nun für jeden Punkt eines Körpers gilt, welcher Licht aussendet, mag es nun sein eigenes oder zerstreutes Licht sein, so kann man auch leicht das Bild eines Gegenstandes construiren. In Fig. 255 sei MM ein ebener Spiegel, AB ein Pfeil, welcher sich vor demselben befindet. Um das Bild der Spitze A zu finden, fällt man ein Perpendikel Ak auf die Spiegelebene und macht die Verlängerung ak desselben gleich Ak; alle von A ausgehenden Strahlen scheinen nach der Spiegelung so zu divergiren, als ob sie von a kämen; a ist also das Bild von A. Ebenso ergiebt sich, daß b das Bild von B ist. Der Anblick der Figur zeigt deutlich, daß Bild und Gegenstand in Beziehung auf die Spiegelebene symmetrisch sind.

Für einen Einfallswinkel von 45^0 reflectirt eine unbelegte Platte von geschliffenem Spiegelglas ungefähr 10 Procent, ein mit Stanniol und Quecksilber belegter Spiegel dagegen 60 bis 70 und ein nach Liebig's Methode mit Silber belegter Glasspiegel 90 Procent des auffallenden Lichtes.

Anwendungen ebener Spiegel. Ebene Spiegel werden öfters 128
zur Construction von physikalischen Apparaten und von Winkelmeßinstrumenten angewendet, von denen folgende die wichtigsten sein dürften:

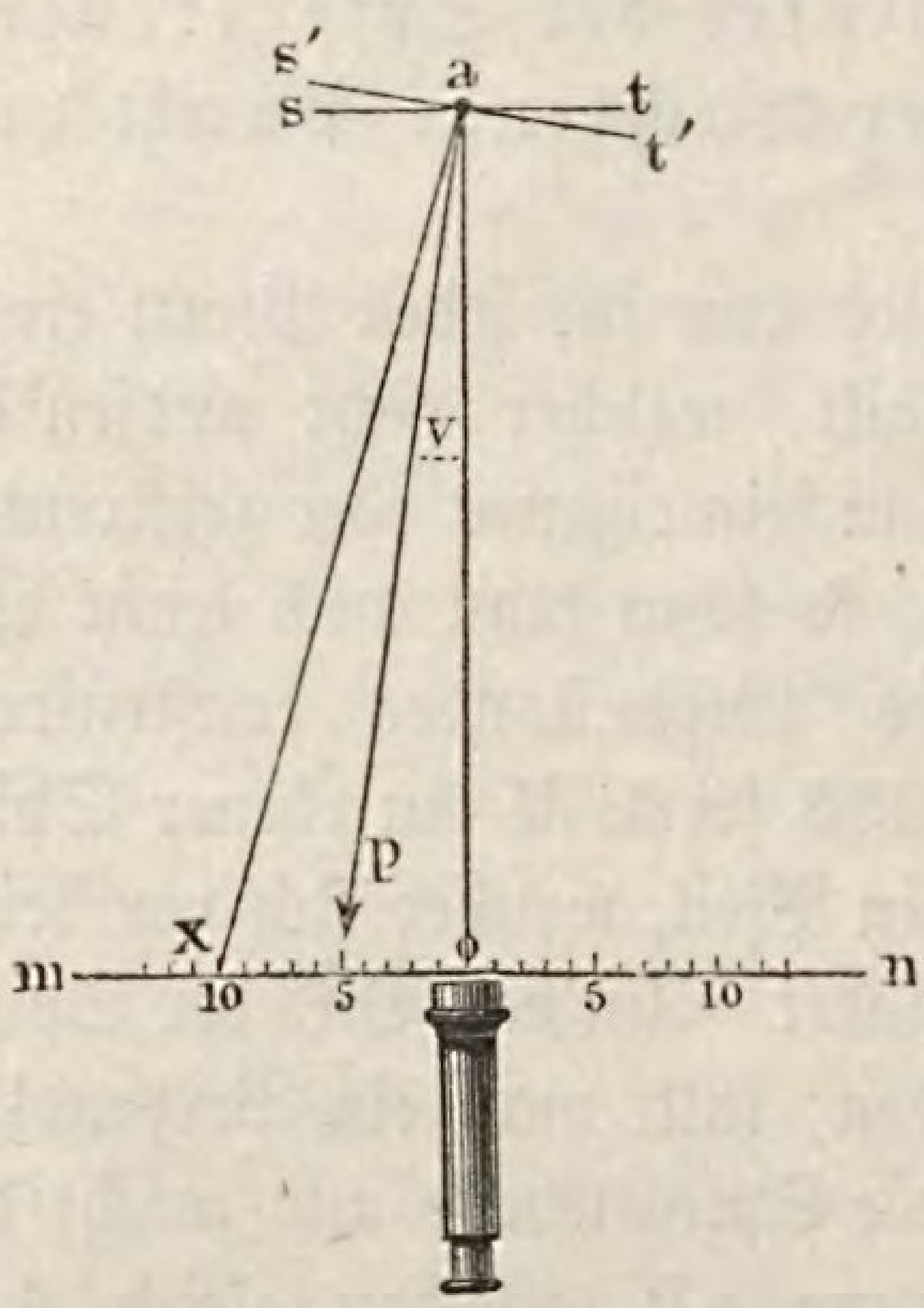
1) Der Heliostat ist ein ebener Spiegel, welcher, vor dem Laden eines verfinsterten Zimmers angebracht, durch eine kleine Oeffnung ein Bündel Sonnenstrahlen in dasselbe hineinwirft. Da die Sonne am Himmel fortwährend ihre Stellung ändert, so muß der Spiegel beständig gedreht werden, wenn das in das dunkle Zimmer eintretende Strahlenbündel eine unveränderte Richtung beibehalten soll. Diese Drehung kann nun entweder mit der Hand oder mittelst eines Uhrwerks ausgeführt werden. Gewöhnlich werden nur Apparate der letzteren Art mit dem Namen eines Holiostats bezeichnet.

2) Der Spiegelsextant ist ein Winkelmeßinstrument, welches im Supplementbande näher besprochen ist.

3) Poggendorff's Spiegelapparat ist eine Vorrichtung, welche dazu dient, sehr kleine Drehungen mit Genauigkeit zu messen. In Fig. 256 (a. f. S.)

sei a die Drehungsaxe eines Körpers, welcher um eine mittlere Lage sich um sehr kleine Winkel hin- und herbewegt, und an dessen Axe ein Spiegel st so befestigt ist, daß er die erwähnten kleinen Drehungen mit macht, während er zur Drehungsaxe eine unveränderliche Stellung behält. — Der mittleren Lage st des Spiegels gegenüber ist nun ein Fernrohr aufgestellt und etwas unterhalb desselben parallel mit st ein Maaßstab mn so befestigt, daß man durch das Fernrohr das Bild der Theilung im Spiegel erblickt. Sobald nun der Spiegel um die Axe a gedreht wird, werden die Theilstriche vor dem Fadenkreuz des Fernrohrs vorbeigehen und so die kleinste Drehung merklich werden.

Fig. 256.



Der Theilstrich, welcher bei der mittleren Lage st des Spiegels am Fadenkreuze des Fernrohrs erscheint, ist mit 0 bezeichnet, so daß von diesem an die Theilstriche des Maaßstabes nach beiden Seiten gezählt werden. Wird nun der Spiegel so gedreht, daß er in die Lage $s't'$ kommt, so wird ein anderer Theilstrich etwa der $n$te am Fadenkreuz des Fernrohres erscheinen; das Einfallsloth ap des Spiegels ist alsdann, so lange der Ablenkungswinkel v nur einige Grade mißt, nach dem Theilstrich $\frac{n}{2}$ gerichtet, und für die Tangente des Ablenkungswinkels v ergiebt sich der Werth

$$tang\, v = \frac{n}{2l},$$

wenn l den Abstand ao des Spiegels vom Maaßstabe bezeichnet, welcher Abstand natürlich mit der Einheit des Maaßstabes gemessen sein muß.

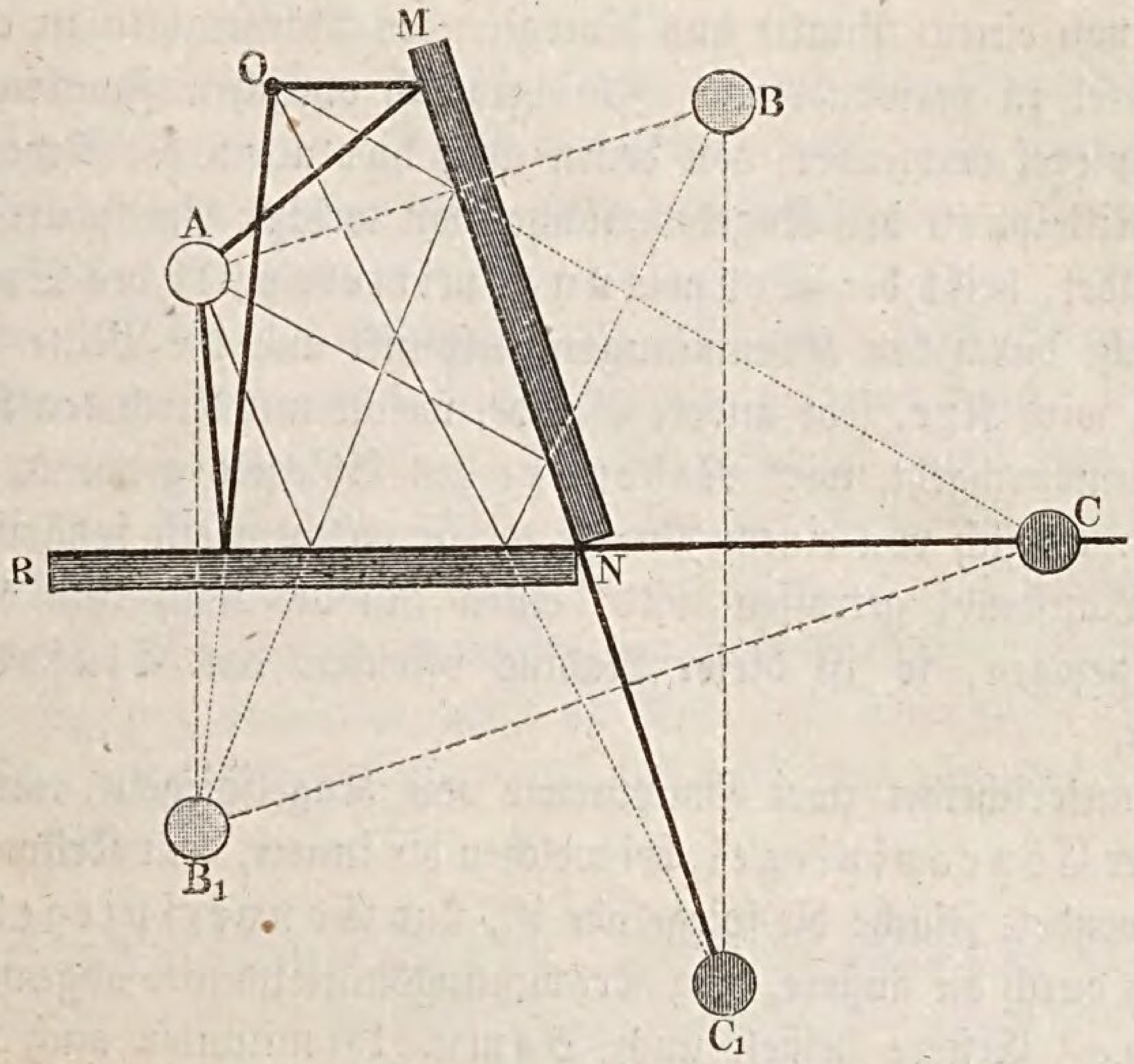
4) Das Goniometer ist ein Instrument, welches dazu dient, den Winkel zu messen, den zwei an einandergränzende Flächen eines Krystalls mit einander bilden; ein Reflexionsgoniometer ist aber ein solches, bei welchem die Spiegelung der Lichtstrahlen durch die Krystallflächen zu diesem Zweck in Anwendung gebracht wird.

Eine nähere Besprechung des Reflexionsgoniometers findet man in allen mineralogischen und krystallographischen Lehrbüchern.

5) Winkelspiegel. Wenn zwei ebene Spiegel unter irgend einem Winkel zusammengestellt werden, so sieht man von einem zwischen ihnen befindlichen Gegenstande mehrere Bilder, deren Zahl von der Neigung der Spiegel abhängt. In Fig. 257 seien MN und RN zwei unter einem Winkel von 72^0 ($^1/_5$ des Kreisumfanges) zusammenstoßende ebene Spiegel, A ein leuchtender Punkt, der sich innerhalb des von ihnen gebildeten Winkels befindet. Zunächst wird durch einmalige Reflexion in dem einen Spiegel das Bild B, im anderen das

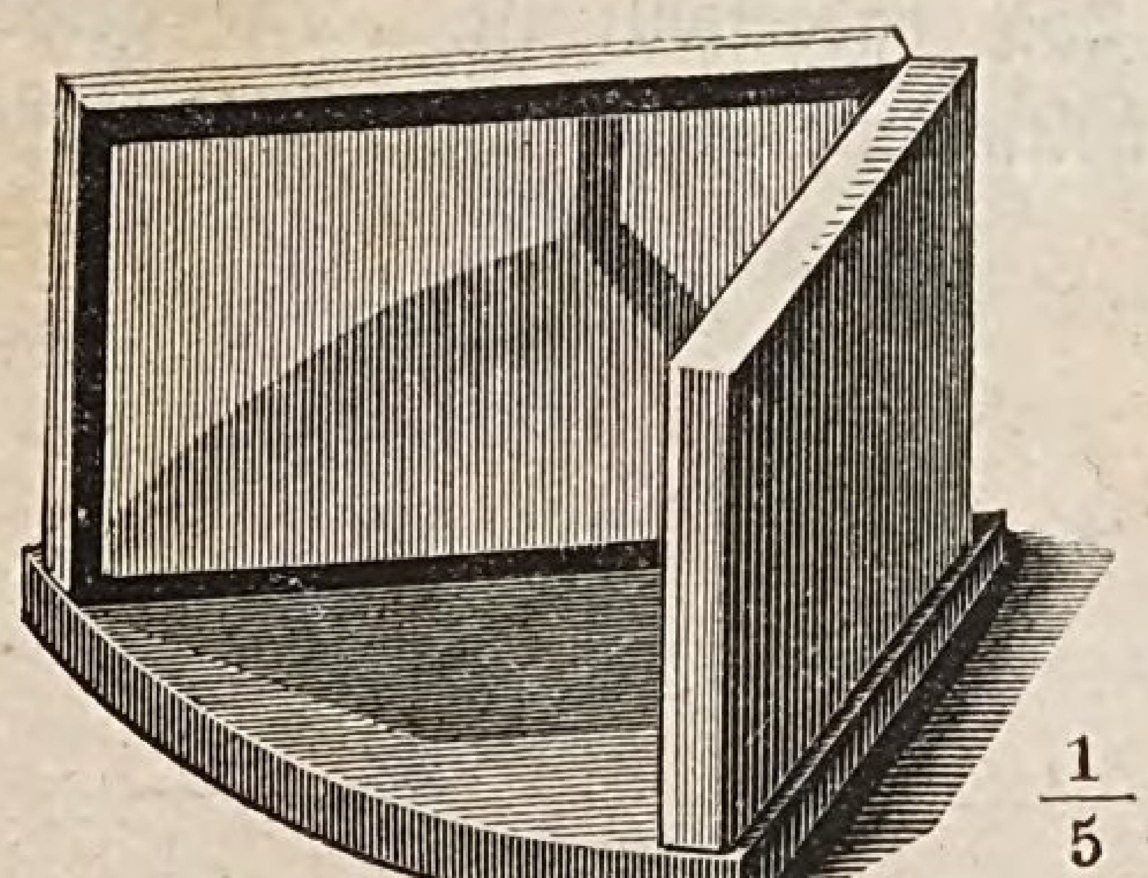
Bild B_1 entstehen. Das Bild B ist aber gleichsam ein Object für den Spiegel RN; daher entsteht noch ein weiteres Bild in C_1, ebenso entsteht auch das Bild

Fig. 257.



C von dem Bilde B_1 in dem Spiegel MN. In der Figur kann man leicht die Lichtstrahlen, welche nach einmaliger Reflexion die Bilder B und B_1 und nach zweimaliger Spiegelung die Bilder C und C_1 liefern, auf ihrem Wege bis ins Auge verfolgen.

Fig. 258.



$\frac{1}{5}$

Wären die Spiegel unter einem Winkel von 60°, 45°, 36° u. s. w. geneigt gewesen, d. h. betrüge der Winkel, den sie machen, $^1/_6$, $^1/_8$, $^1/_{10}$, des ganzen Kreisumfanges, so würde man, den Gegenstand selbst mitgerechnet, 6, 8, 10 u. s. w. Bilder sehen.

Fig. 258 zeigt Winkelspiegel, welche einen Winkel von 60° mit einander machen. Das Kaleidoskop und das Debuskop sind Anwendungen der Winkelspiegel.

Wie man sieht, vermehrt sich die Anzahl der Bilder, wenn der Winkel kleiner wird; ihre Anzahl wird unendlich groß, wenn der Winkel der Spiegel Null ist, d. h. wenn die Spiegel einander parallel sind.

Reflexion auf gekrümmten Spiegeln. Wenn ein Lichtstrahl 129
einen gekrümmten Spiegel in einem Punkte trifft, den wir mit a bezeichnen wollen, so wird er vollkommen ebenso reflectirt, als ob er die in a an die krumme Fläche gelegte Berührungsebene getroffen hätte, oder mit anderen Worten, wenn man sich im Punkte a eine Senkrechte auf die krumme Fläche errichtet denkt so ist diese das Einfallsloth.

In der Praxis kommen nur Kugelspiegel oder sphärische Spiegel vor, d. h. solche, deren spiegelnde Flächen Stücke von Kugeloberflächen sind, oder vielleicht hier und da noch parabolische Spiegel, wenn es sich darum handelt, die von einem Punkte aus divergirenden Lichtstrahlen in ein paralleles Strahlenbündel zu verwandeln. Zu eigentlich optischen Zwecken werden nur sphärische Spiegel verwendet, von denen auch hier allein die Rede sein wird.

Der Mittelpunkt der Kugeloberfläche, von welcher ein sphärischer Spiegel ein Stück bildet, heißt der Krümmungsmittelpunkt des Spiegels. Die Gerade, welche durch den Krümmungsmittelpunkt und die Mitte des Spiegels hindurchgeht, wird Axe, jede andere Gerade, welche nur durch den Krümmungsmittelpunkt hindurchgeht, wird Nebenaxe des Spiegels genannt.

Denkt man sich von einem Punkte a, in welchem ein sphärischer Spiegel von einem Lichtstrahl getroffen wird, einen Radius nach dem Krümmungsmittelpunkt gezogen, so ist dieser Radius offenbar das Einfallsloth für den Punkt a.

Man unterscheidet zwei Hauptarten von Kugelspiegeln, nämlich Hohlspiegel oder Concavspiegel, bei welchen die innere, dem Krümmungsmittelpunkte zugewendete Fläche die spiegelnde ist, und Convexspiegel, bei welchen die Reflexion durch die äußere, dem Krümmungsmittelpunkte abgewendete Fläche bewirkt wird. Erstere heißen auch Sammel- mitunter auch Vergrößerungsspiegel; letztere Zerstreuungs- oder Verkleinerungsspiegel.

Die gewöhnlichen Rasirspiegel bilden die bekannteste Form der Hohlspiegel; sie sind durch eine auf der einen Seite ebene, auf der anderen gewölbte Glaslinse gebildet, deren Durchschnitt in Fig. 259 dargestellt ist. Die gewölbte Fläche AdB ist mit dem Spiegelamalgam belegt und bildet eigentlich den Hohl-

Fig. 259.

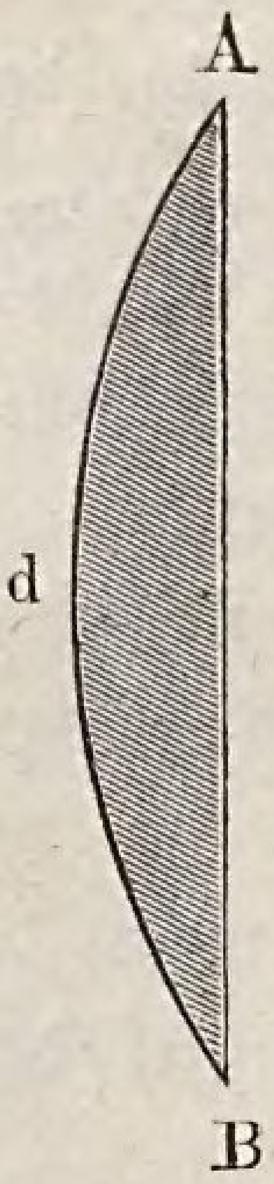
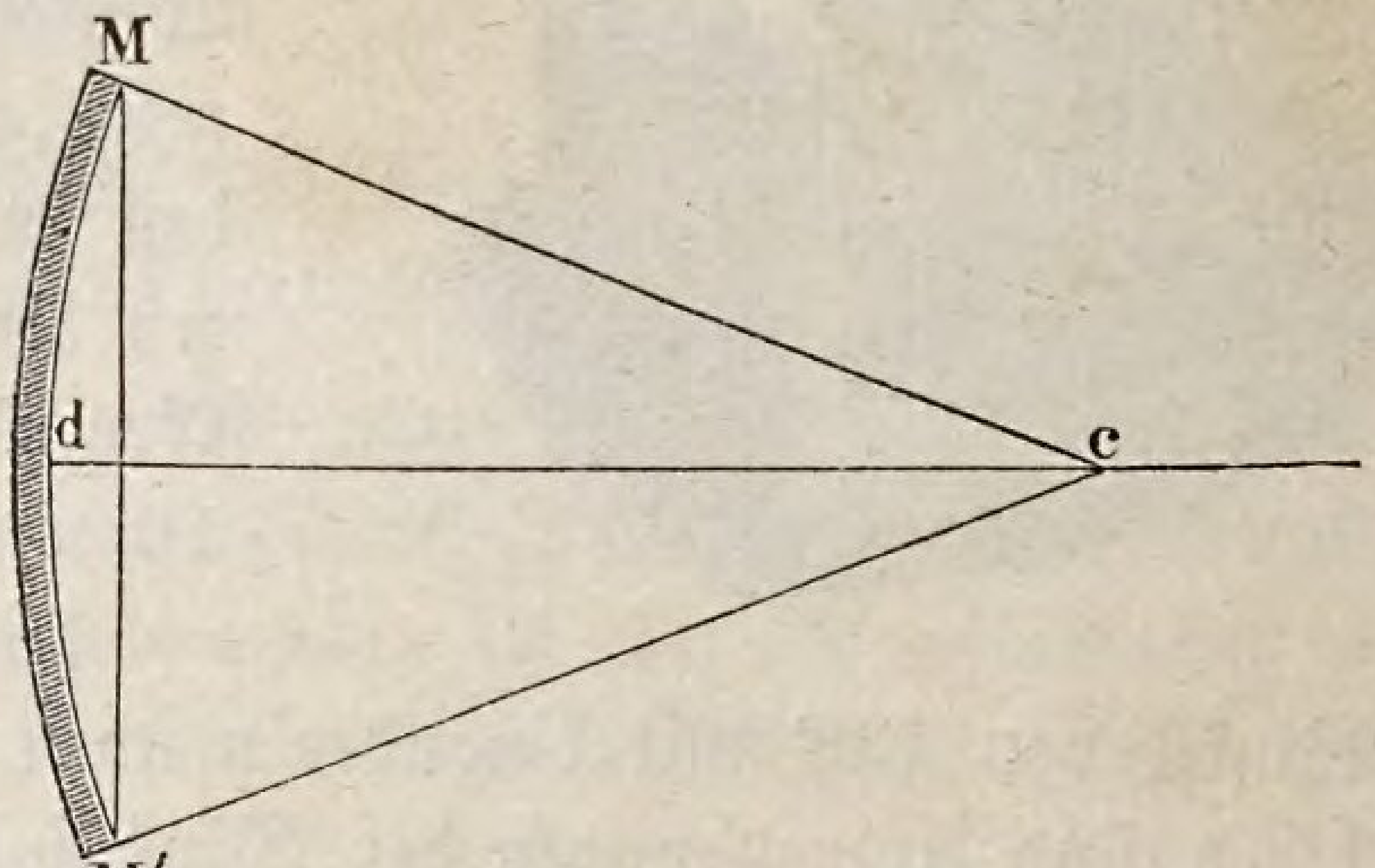


Fig. 260.



spiegel. Die Reflexion auf der ebenen Vorderfläche AB, welche zwar nur sehr schwach ist gegen die Spiegelung auf der belegten gewölbten Fläche AdB, beeinträchtigt dennoch ebenso die Reinheit der Bilder wie der Umstand, daß die Lichtstrahlen, bevor sie auf die spiegelnde Fläche AdB gelangen können, erst die Glassubstanz durchlaufen müssen. Deshalb darf man, wenn es auf Darstellung sehr reiner Hohlspiegelbilder ankommt, wie bei Spiegelteleskopen, solche

gläserne Hohlspiegel nicht in Anwendung bringen, sondern sphärisch geschliffene Metallflächen. Das Spiegelmetall, dessen man sich zur Herstellung von Hohlspiegeln für Spiegelteleskope bedient, ist eine Legirung von 2 Theilen Kupfer, 1 Theil Zinn und $^1/_{16}$ Arsen.

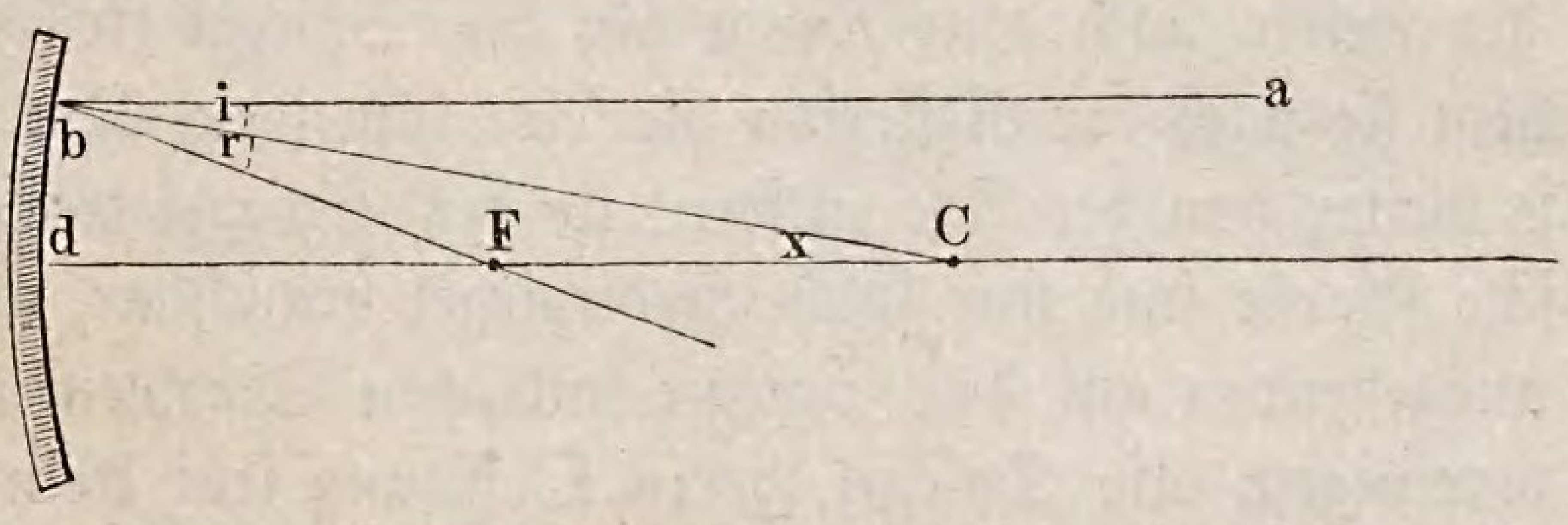
In neuerer Zeit werden zur Construction von Spiegelteleskopen mit dem besten Erfolg Hohlspiegel von Glas verwendet, welche mit einer ganz dünnen polirten Silberschicht so überzogen sind, daß die äußere, nicht am Glas anliegende Silberfläche die spiegelnde ist.

Fig. 260 stellt den Durchschnitt eines sphärischen Spiegels mit einer durch seinen Krümmungsmittelpunkt und seine Mitte gelegten Ebene dar. Nehmen wir, wie es gewöhnlich der Fall ist, den Kugelspiegel kreisförmig begränzt an, so wird eine Linie MM', Fig. 260, welche zwei diametral gegenüberstehende Punkte des Spiegelrandes mit einander verbindet, der Durchmesser des Spiegels genannt. Die Linie cd, welche den Krümmungsmittelpunkt c mit der Mitte des Spiegels d verbindet, heißt die Axe des sphärischen Spiegels; der Winkel endlich, welchen die Linien cM und cM' mit einander machen, heißt seine Oeffnung.

Sphärische Hohlspiegel. Wenn ein Strahlenkegel, welcher von 130
einem etwas entfernteren leuchtenden Punkte ausgeht, auf einen Hohlspiegel fällt, so werden alle Strahlen desselben so reflectirt, daß sie sehr nahe wieder in einem Punkte vereinigt werden, vorausgesetzt, daß die Oeffnung des Spiegels höchstens 6 bis 8^0 beträgt und die Strahlen möglichst senkrecht auf den Spiegel fallen.

Betrachten wir zunächst die Strahlen, welche von einem auf der Axe in unendlicher Entfernung liegenden Punkte aus auf den Spiegel fallen. Da die Divergenz dieser Strahlen verschwindend klein ist, so sind sie sämmtlich als mit der Axe parallel zu betrachten. In Fig. 261 sei ab ein Lichtstrahl, welcher parallel mit der Axe in b den Hohlspiegel trifft. Denken wir uns vom

Fig. 261.



Krümmungsmittelpunkte C des Hohlspiegels einen Radius nach b gezogen, so ist dies das Einfallsloth für den einfallenden Strahl ab; man findet also die Richtung des reflectirten Strahles, wenn man den Winkel r gleich dem Winkel i macht. Da nun aber auch der Winkel x gleich dem Winkel i, so ist das Dreieck bFC ein gleichschenkeliges, und zwar ist $bF = FC$. So lange aber der Winkel x klein bleibt, der Bogen bd also nur wenige Grade überspannt, ist $bF + FC$ nicht merklich größer als der Radius bC, es ist also auch $FC = \frac{1}{2}\, bC = \frac{1}{2}\, dC$; der Punkt F also, in welchem der reflectirte Strahl

die Axe schneidet, liegt in der Mitte zwischen dem Krümmungsmittelpunkte C und der Mitte des Spiegels d.

Da dies nun wahr ist, so lange der Winkel x klein genug bleibt, so folgt, daß ein Hohlspiegel von kleiner Oeffnung alle Strahlen, welche parallel mit der Axe auf ihn fallen, in einem Punkte F vereinigt, welcher um den halben Krümmungshalbmesser von der Mitte des Spiegels entfernt ist, wie dies durch Fig. 262 anschaulich gemacht wird.

Dieser Vereinigungspunkt parallel mit der Axe auf den Hohlspiegel fallender Strahlen wird der Focus oder Brennpunkt des Hohlspiegels genannt.

Fig. 262.

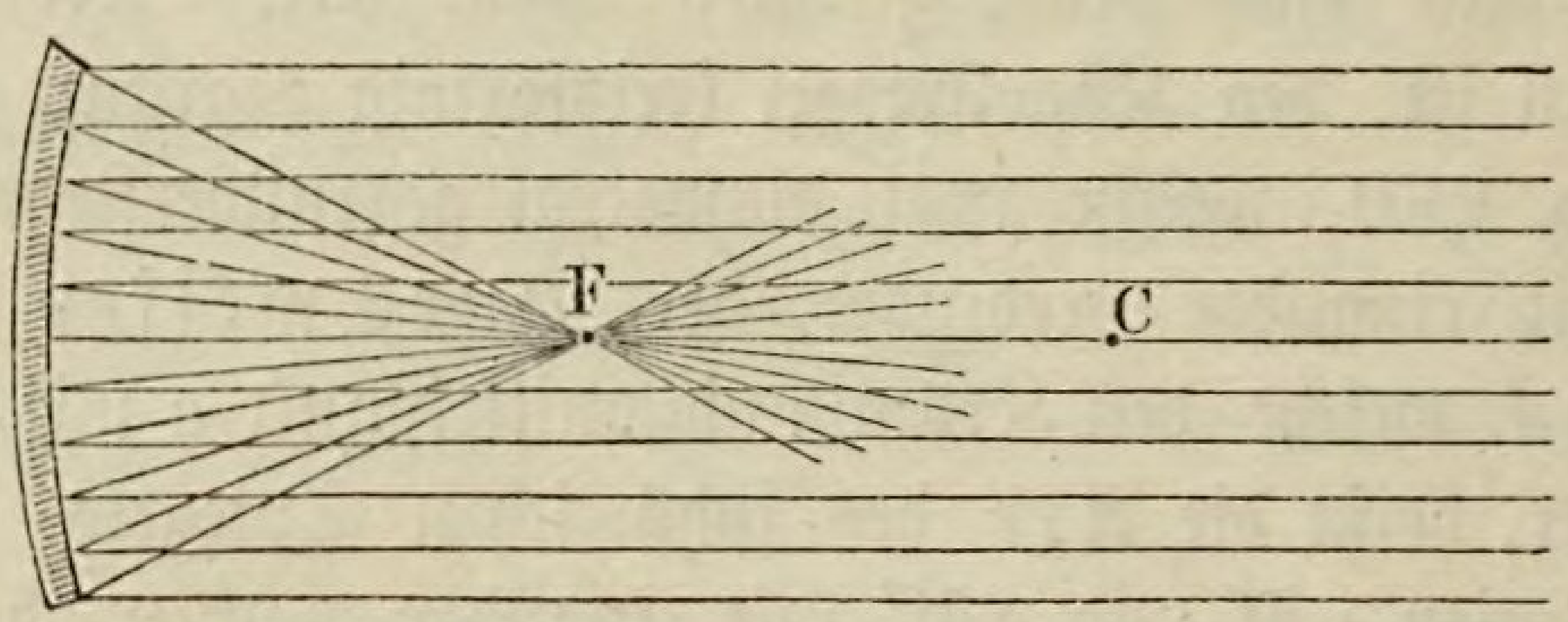
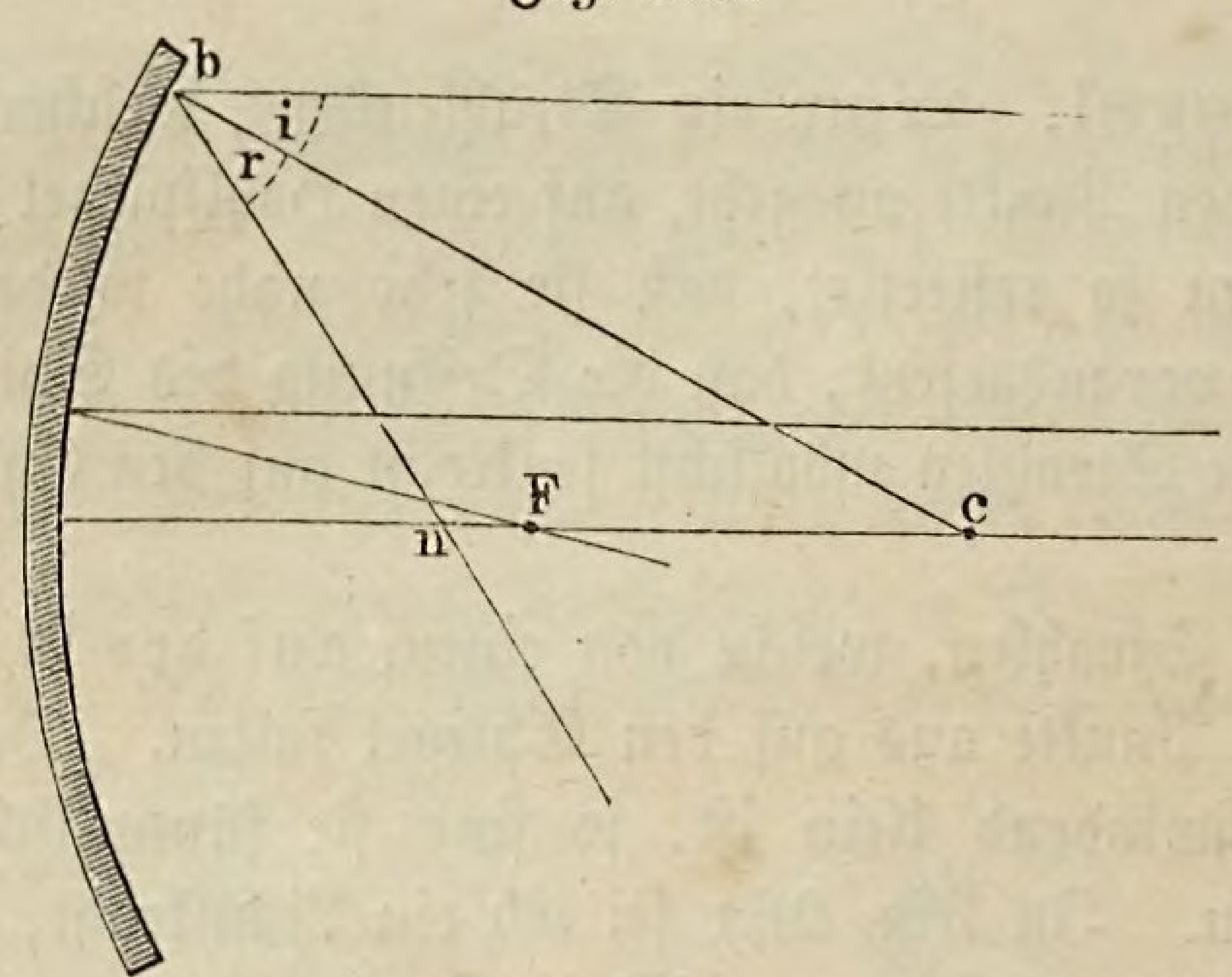


Fig. 263.



Wenn aber die Oeffnung des Hohlspiegels groß ist, wie bei dem Fig. 263 dargestellten, so werden die Randstrahlen nicht mehr im Brennpunkte F die Axe schneiden können; denn sobald die Winkel i und r eine namhafte Größe erreichen, wird auch die Summe der beiden Dreieckseiten nc und nb namhaft größer sein als bc, der Punkt n wird also dem Spiegel näher liegen als der Brennpunkt F. Nur diejenigen Strahlen, welche in den mittleren Theil des Spiegels einfallen und deshalb centrale Strahlen heißen, werden im Brennpunkte vereinigt; für die weiter nach dem Rande hin den Spiegel treffenden rückt der Punkt, in welchem sie nach der Reflexion die Axe schneiden, dem Spiegel selbst um so näher, je weiter von der Axe entfernt sie den Spiegel treffen.

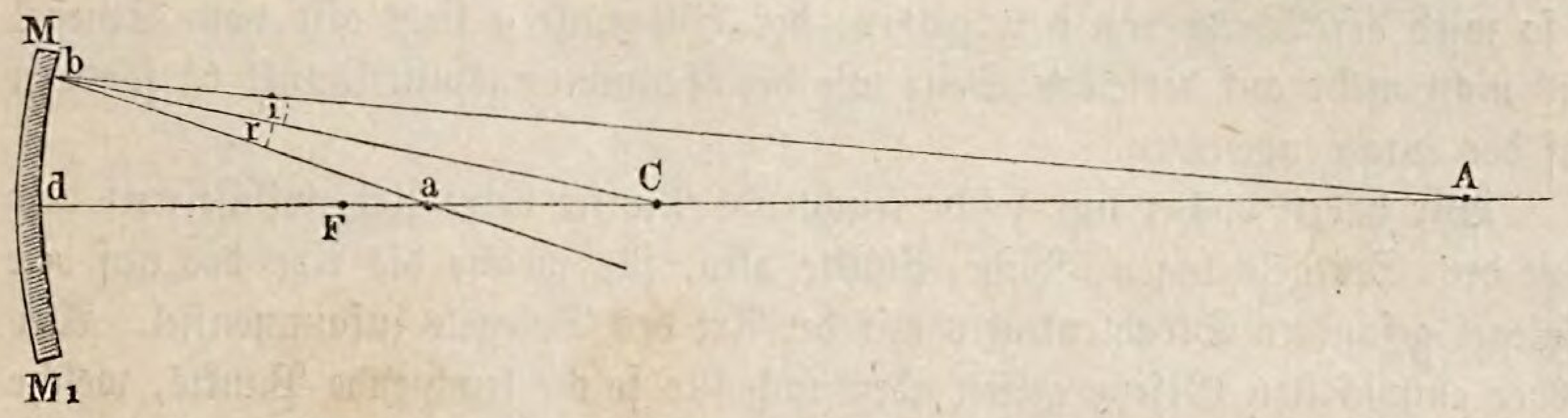
Für optische Zwecke sind nur solche Hohlspiegel brauchbar, welche alle von einem Punkte ausgehenden auf den Spiegel fallenden Strahlen auch wieder in einem Punkte vereinigen, also Spiegel, deren Oeffnung sehr klein ist. In dem Folgenden soll auch nur von solchen Hohlspiegeln die Rede sein.

Der erwähnte Fehler, daß nicht alle mit der Axe parallel einfallenden Strahlen genau in einem Punkte vereinigt werden, wird sphärische Aberration genannt.

Wenn der leuchtende Punkt nicht unendlich weit liegt, sondern in solcher Entfernung, daß man die Divergenz der den Spiegel treffenden Strahlen nicht mehr unberücksichtigt lassen darf, so ändert auch der Vereinigungspunkt seine Stellung, und zwar rückt er vom Spiegel mehr und mehr weg, je mehr sich

der leuchtende Punkt dem Spiegel nähert. Daß dem so sei, ist aus Fig. 264 leicht zu ersehen. Je näher der leuchtende Punkt A gegen den Spiegel rückt, desto kleiner wird i, desto kleiner wird also auch r, und desto mehr rückt also

Fig. 264.



a nach C hin. Wenn man also einen leuchtenden Punkt, der so weit vom Spiegel entfernt ist, daß seine Strahlen im Hauptbrennpunkte wieder vereinigt werden, dem Spiegel fortwährend nähert, so wird der Vereinigungspunkt a fortwährend dem Krümmungsmittelpunkte C näher rücken, bis endlich, wenn der leuchtende Punkt im Centrum des Spiegels steht, der Vereinigungspunkt mit dem leuchtenden Punkte zusammenfällt. Rückt der leuchtende Punkt dem Spiegel noch näher, so fällt der Vereinigungspunkt weiter und weiter vom Spiegel. Läge z. B. der leuchtende Punkt in a, so würde A der Vereinigungspunkt sein, und wenn der leuchtende Punkt den Brennpunkt F, Fig. 262, selbst einnimmt, so werden seine Strahlen vom Spiegel parallel mit der Axe reflectirt.

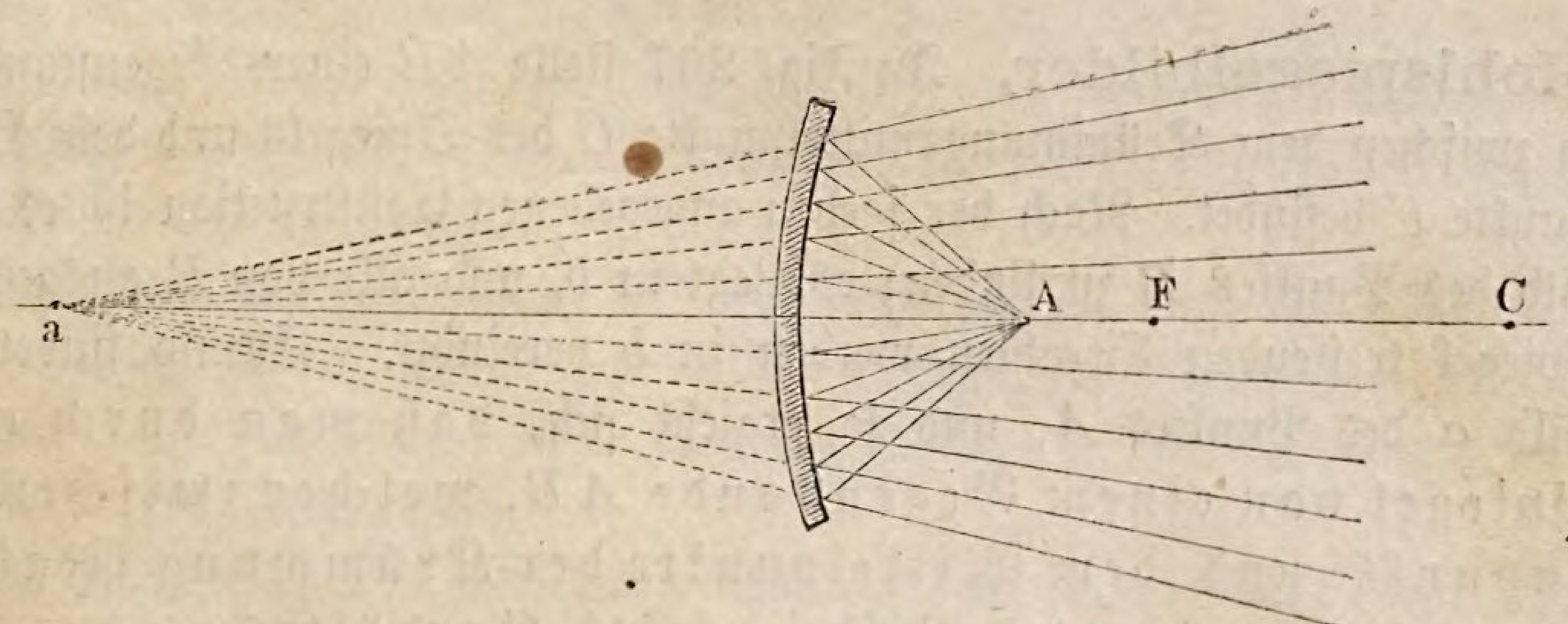
Die beiden zusammengehörigen Punkte A und a, von welchen der eine das Bild des anderen ist, werden conjugirte Punkte genannt. Bezeichnen wir mit g den Abstand des leuchtenden Punktes, mit b den Abstand seines Bildes von der Mitte d des Hohlspiegels, so ist

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

wenn f die Brennweite des Hohlspiegels bezeichnet. Die Entwickelung dieser Gleichung findet man im Supplementbande.

In Fig. 265 ist noch der einzig übrige Fall dargestellt, nämlich daß der leuchtende Punkt A zwischen dem Spiegel und dem Brennpunkte F

Fig. 265.

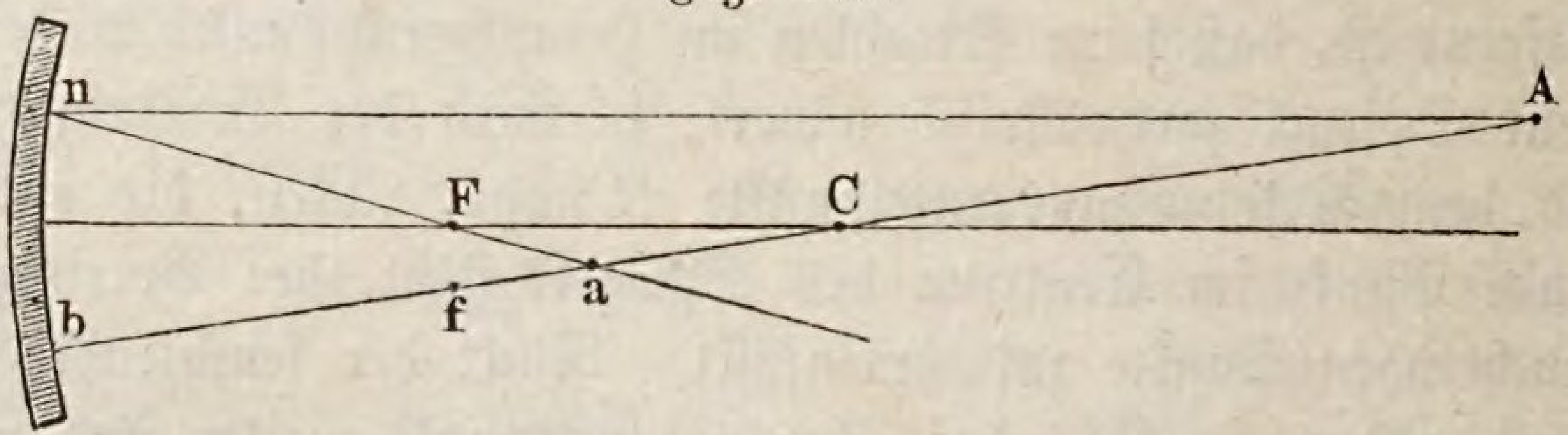


liegt. Hier werden die Strahlen so reflectirt, daß sie nach der Reflexion divergiren, als ob sie von einem Punkte a kämen, der hinter dem Spiegel liegt, und den man für jeden besonderen Fall durch Construction leicht finden kann.

Die Gleichung 1) paßt auch auf diesen Fall. Wird nämlich g kleiner als f, so wird der Werth von b negativ, der Bildpunkt a liegt also vom Spiegel aus nicht mehr auf derselben Seite wie der Krümmungsmittelpunkt C, sondern auf der entgegengesetzten.

Wir haben bisher nur solche leuchtende Punkte betrachtet, welche auf der Axe des Spiegels lagen, solche Punkte also, für welche die Axe des auf den Spiegel gesandten Strahlenkegels mit der Axe des Spiegels zusammenfiel. Alle bisher entwickelten Gesetze gelten aber auch für solche leuchtende Punkte, welche außerhalb der Axe des Spiegels liegen; es sei z. B. in Fig. 266 A ein sol-

Fig. 266.

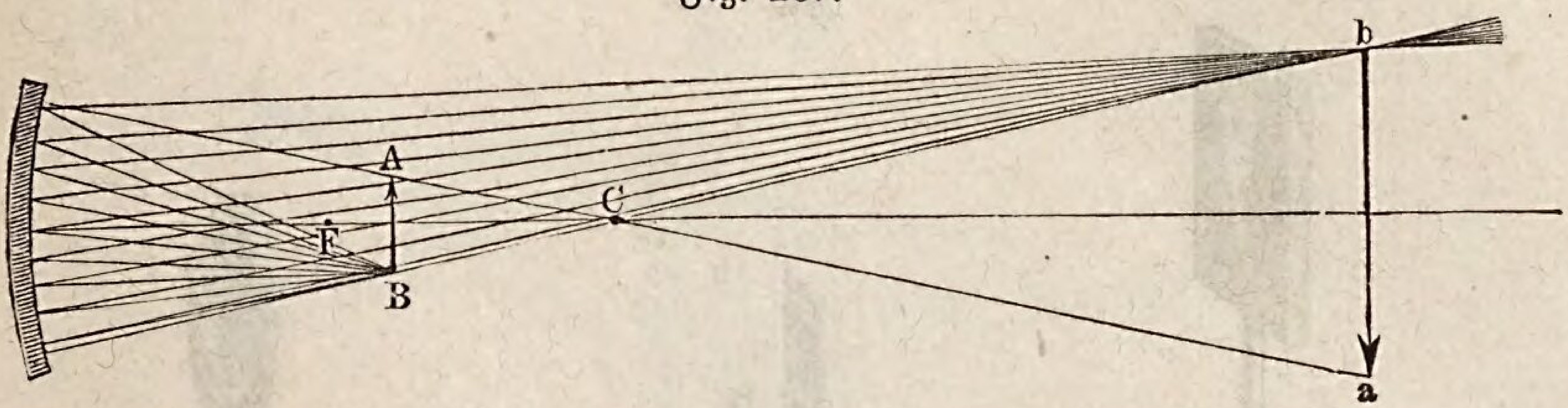


cher leuchtender Punkt. Zieht man von A über C eine Linie nach dem Spiegel, so müssen sich auf der Nebenaxe Ab alle von A ausgehenden Strahlen wieder vereinigen. Wenn ein ganzes Bündel Strahlen mit ACb parallel auf den Spiegel fiele, so würden sie sich nach der Reflexion im Punkte f vereinigen, der in der Mitte zwischen C und b liegt; da aber die von A ausgehenden Strahlen divergiren, so liegt ihr Vereinigungspunkt weiter vom Spiegel ab als f. Der Abstand des Bildes a vom Punkte b ist gleichfalls nach Gleichung 1) zu berechnen; man kann seine Lage aber auch durch folgende Construction finden. Man ziehe von A eine Linie An parallel mit der Axe des Spiegels. Ein Strahl, der in dieser Richtung den Spiegel trifft, wird aber bekanntlich nach dem Hauptbrennpunkte F reflectirt; zieht man nun von n über F eine gerade Linie, so wird diese die Linie ACb schneiden, und der Durchschnittspunkt a ist offenbar derjenige, in welchem alle von A ausgehenden Strahlen nach ihrer Reflexion durch den Spiegel wieder vereinigt werden, kurz a ist das Bild von A. Umgekehrt würde von einem leuchtenden Punkte in a ein Bild in A entstehen.

131 **Hohlspiegelbilder.** In Fig. 267 stelle AB einen Gegenstand vor, der sich zwischen dem Krümmungsmittelpunkte C des Spiegels und dem Hauptbrennpunkte F befindet. Nach der soeben angegebenen Construction ist es leicht, das Bild des Punktes B zu finden; es liegt in b, und alle von B ausgehenden den Spiegel treffenden Strahlen werden in b vereinigt. Ebenso findet man das Bild a des Punktes A, und so ergiebt sich, daß man durch einen Hohlspiegel von einem Gegenstande AB, welcher zwischen dem Brennpunkte und dem Mittelpunkte der Krümmung liegt, ein verkehrtes, vergrößertes Bild jenseits C erhält.

Da die von B ausgehenden Strahlen in b gesammelt werden, so werden auch umgekehrt, wenn b ein leuchtender Punkt ist, die von ihm ausgehenden

Fig. 267.



Strahlen durch den Spiegel nach B reflectirt; kurz B ist in diesem Falle das Bild von b; ebenso ist A das Bild von a. Wenn sich also ein Gegenstand ab jenseits des Mittelpunktes C befindet, so wird der Hohlspiegel von ihm ein verkehrtes, verkleinertes Bild zwischen dem Mittelpunkte C und dem Hauptbrennpunkte F entwerfen.

Die Bilder, welche wir soeben betrachtet haben, sind von denen der ebenen Spiegel wesentlich verschieden. Alle Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte ausgehen, werden von einem ebenen Spiegel in einer solchen Richtung reflectirt, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel herkämen; sie divergiren also von einem Punkte, in welchem sie nie vereinigt waren. Die Bilder, welche durch solche Strahlen entstehen, werden als virtuelle Bilder oder Scheinbilder, bezeichnet. In den eben betrachteten Fällen wurden aber die von einem Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen durch den Spiegel wirklich wieder in einem Punkte gesammelt und deshalb werden diese Bilder zum Unterschiede von den virtuellen Bildern reelle Bilder oder Sammelbilder genannt. Die reellen Bilder lassen sich auf einem Schirme von weißem Papier oder mattgeschliffenem Glase auffangen und verhalten sich dann in Bezug auf das Auge wie der Gegenstand selbst; die durch die Concentration der Strahlen stark erleuchteten Punkte des Schirmes, von dem natürlich fremdes Licht abgehalten sein muß, zerstreuen nämlich das Licht nach allen Seiten hin, und somit ist das Bild selbst dann noch sichtbar, wenn die vom Spiegel reflectirten Strahlen nicht direct ins Auge gelangen.

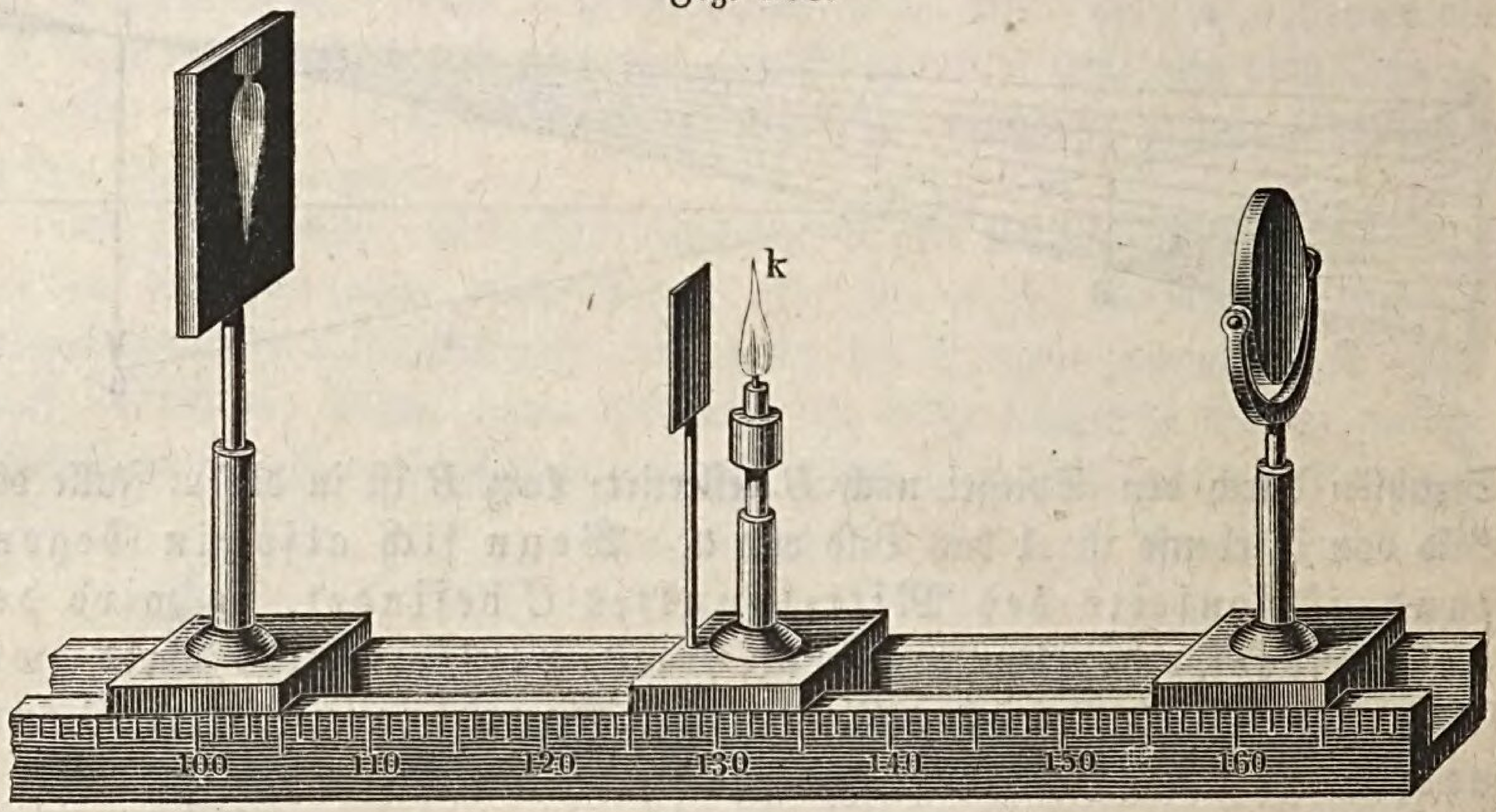
Die Sammelbilder lassen sich also auf zweierlei Weise beobachten, nämlich entweder, wenn man sie auf einem Schirm auffängt, oder wenn man das Auge an eine entsprechende Stelle des Strahlenbündels bringt, welches von dem Vereinigungspunkte aus divergirt.

Man kann also z. B. das Bild des Punktes B, Fig. 267, sehen, wenn man das Auge in das von b aus wieder divergirende Strahlenbündel bringt. In diesem Falle schwebt das Bild vor dem Spiegel in der Luft und wird deshalb auch Luftbild genannt.

Fig. 268 (a. f. S.) stellt einen Apparat dar, welcher dazu dient, die Gesetze der durch Hohlspiegel erzeugten Sammelbilder nachzuweisen.

Je weiter der Gegenstand von dem Hohlspiegel entfernt wird, desto mehr muß sich begreiflicherweise das Bild dem Hauptbrennpunkte nähern, das Bild

Fig. 268.



der so gut wie unendlich weit entfernten Sonne muß also im Hauptbrennpunkte selbst liegen, wenn die Axe des Spiegels nach der Sonne gerichtet ist. Fallen die Sonnenstrahlen schräg, also nicht in der Richtung der Spiegelaxe, auf, so liegt das Bild natürlich nicht mehr in der Spiegelaxe, sondern seitwärts, seine Entfernung von dem Spiegel ist aber stets dem halben Krümmungshalbmesser desselben gleich. Da uns die Sonne unter einem Winkel von ungefähr 30′ erscheint, so muß auch das Sonnenbildchen, vom Krümmungsmittelpunkte aus gesehen, unter demselben Winkel erscheinen; seine absolute Größe hängt also von dem Krümmungshalbmesser des Spiegels ab. Im Brennpunkte des großen Reflectors von Herschel z. B., dessen Krümmungshalbmesser 24 m mißt, hat das Sonnenbild ungefähr 10 cm Durchmesser; der Durchmesser des Sonnenbildes ist ungefähr 4 mm, wenn der Krümmungshalbmesser des Spiegels 1 m beträgt.

Um den Krümmungshalbmesser eines Hohlspiegels zu finden, braucht man nur zu messen, wie weit das Sonnenbildchen vom Spiegel liegt; denn diese Entfernung doppelt genommen, ist ja dem Krümmungshalbmesser des Spiegels gleich.

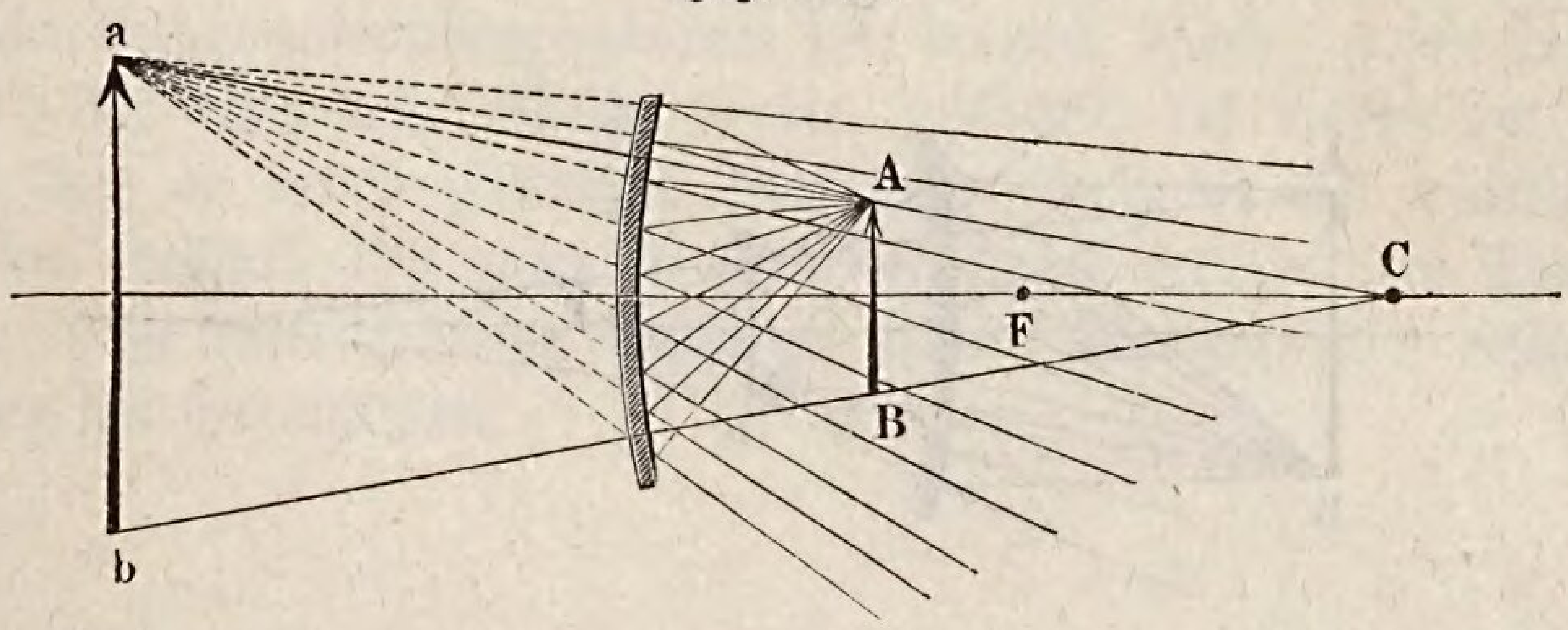
Die Bilder solcher Gegenstände, welche um mehr als die 100fache Länge des Krümmungshalbmessers vom Spiegel entfernt sind, sind dem Brennpunkte selbst noch ganz außerordentlich nahe.

Es ist jetzt die Lage des Bildes nur noch für den Fall zu ermitteln, daß der Gegenstand zwischen dem Spiegel und dem Brennpunkte liegt. Wir haben gesehen, daß alle Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte ausgehen, der dem Hohlspiegel näher liegt als der Hauptbrennpunkt, so reflectirt werden, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel her-

kämen; in dem hier zu betrachtenden Falle kann also natürlich kein Sammelbild entstehen; wir haben es mit einem virtuellen Bilde zu thun.

In Fig. 269 sei AB der Gegenstand, dessen Bild wir suchen wollen.

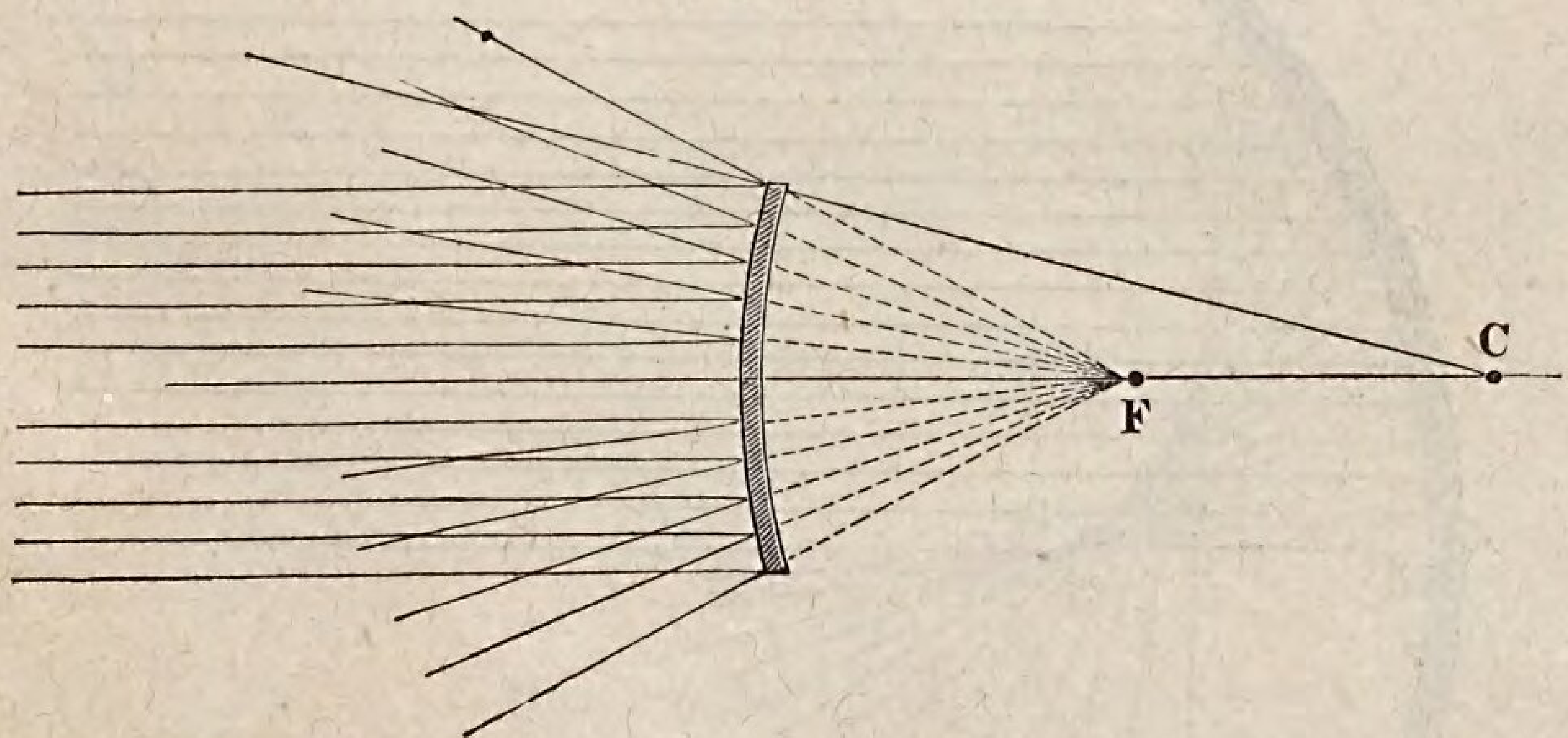
Fig. 269.



Nach der oben angegebenen Construction ist es leicht, die Lage des Punktes a zu ermitteln, von welchem die von A kommenden Strahlen divergiren, nachdem sie von dem Hohlspiegel reflectirt worden sind; ebenso läßt sich das Bild b des Punktes B finden. Wenn also der Gegenstand zwischen dem Brennpunkte und dem Spiegel liegt, so fällt sein vergrößertes aufrechtes Bild hinter den Spiegel, es verhält sich also, die Vergrößerung abgerechnet, ganz wie die Bilder der ebenen Spiegel.

Die Convexspiegel haben keine wirklichen, sondern nur virtuelle Bild- 132
punkte, d. h. die Strahlen, welche einen solchen Spiegel treffen, werden nicht in einem Punkte vor dem Spiegel vereinigt, sondern sie divergiren nach der Spiegelung so, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel herkämen. Wenn ein Convexspiegel von einem Strahlenbündel getroffen wird, welches der Spiegelaxe parallel ist, wie Fig. 270 zeigt, so werden alle Strahlen so reflectirt, als

Fig. 270.

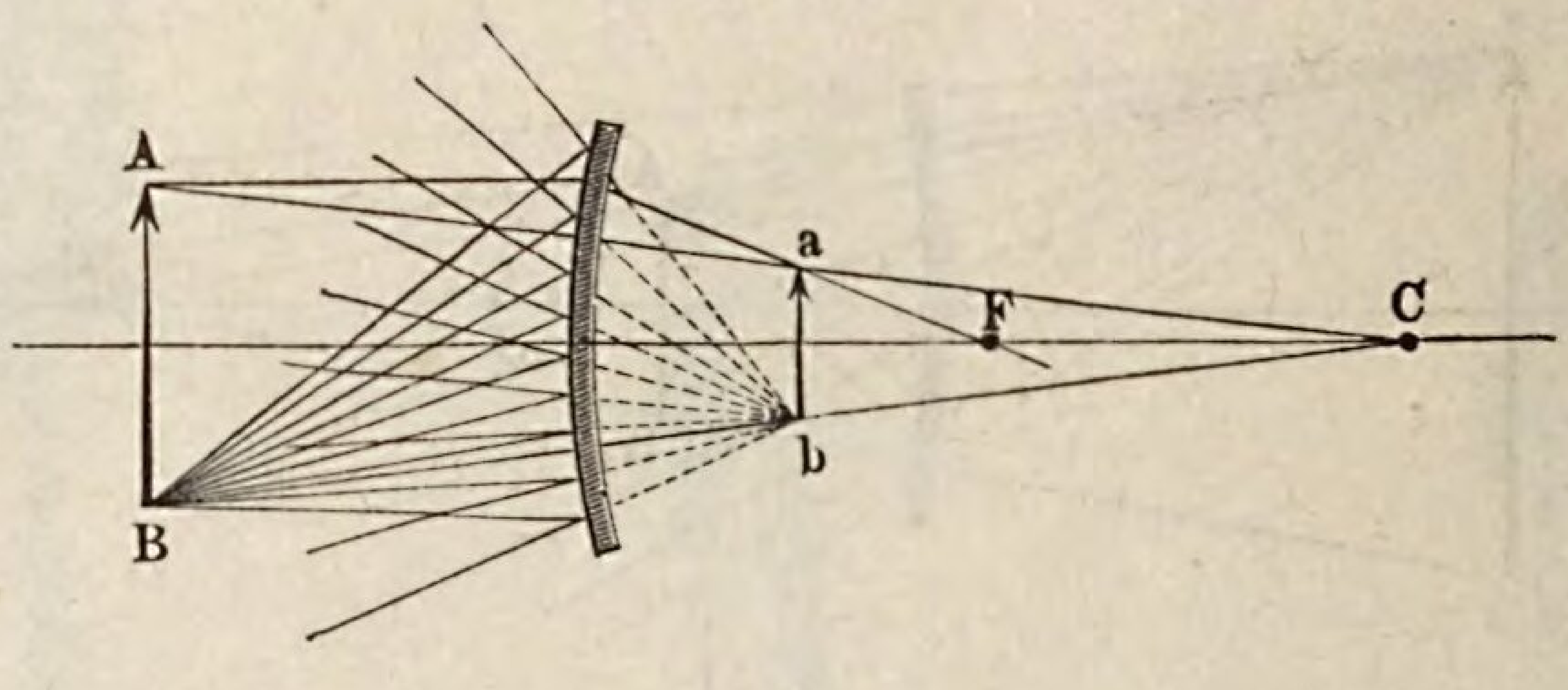


ob sie vom Hauptzerstreuungspunkte F kämen, welcher in der Mitte zwischen dem Spiegel und dem Mittelpunkte C liegt. Demnach ist es leicht, die Bilder zu construiren, welche man durch solche Spiegel erhält.

Es sei AB, Fig. 271 (a. f. S.), ein vor einem Convexspiegel befindlicher Gegenstand. Ein Strahl, welcher von A in der Richtung AC auf den

Spiegel fällt, wird in derselben Richtung reflectirt, in welcher er kam; das Bild von A muß also auf der Linie $A\,C$ liegen. Ein anderer Strahl, der von A aus parallel mit der Spiegelaxe auf den Spiegel trifft, wird so reflectirt, als

Fig. 271.

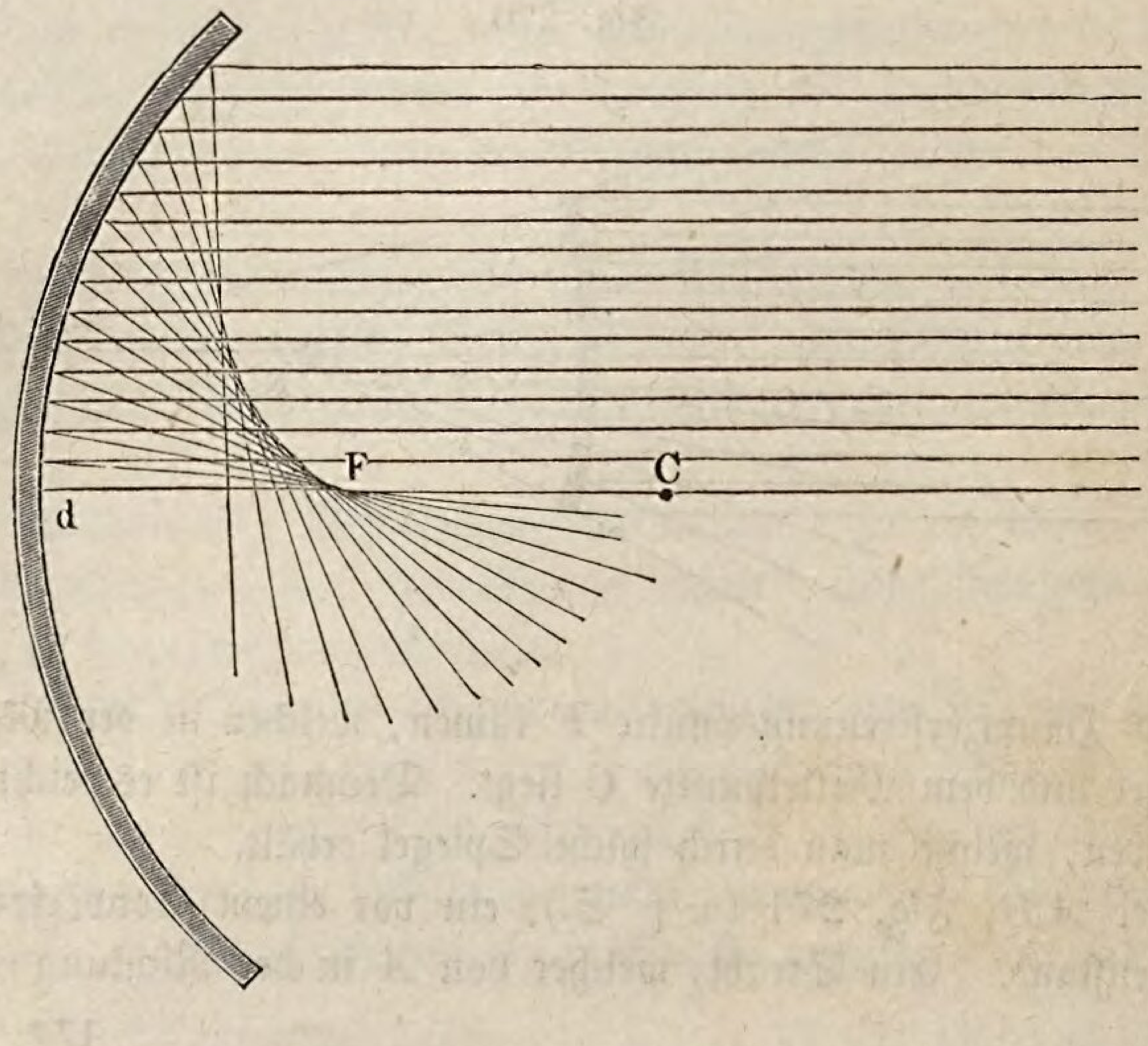


ob er vom Hauptzerstreuungspunkt F käme; das Bild von A liegt also in dem Durchschnittspunkte a der beiden reflectirten Strahlen. Alle übrigen von A ausgehenden Strahlen werden von dem Convexspiegel ebenfalls so reflectirt, als ob sie von a herkämen.

Nachdem man auch das Bild b des Punktes B gefunden hat, überzeugt man sich leicht, daß man durch Convexspiegel verkleinerte aufrechte Bilder hinter dem Spiegel erhält. Diese Bilder sind stets virtuell. — In unserer Figur ist noch der Gang des von B aus divergirenden und von dem Convexspiegel reflectirten Strahlenbündels dargestellt.

133 **Von den Brennlinien.** Wenn auch die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Lichtstrahlen nach ihrer Reflexion durch eine Kugelfläche nicht genau in einem und demselben Punkte wieder vereinigt werden, so werden sich

Fig. 272.



doch immer je zwei benachbarte reflectirte Strahlen in einem Punkte schneiden; alle Durchschnittspunkte je zweier benachbarter in einerlei Ebene reflectirter Strahlen geben eine krumme Linie, die man Brennlinie oder kaustische Linie nennt. Die Gesammtheit aller durch eine spiegelnde Kugelfläche erzeugten Brennlinien bilden zusammengenommen eine krumme Fläche, welche kaustische Fläche heißt. In dieser Fläche ist die Intensität des Lichtes am größten, wie man dies an der herzförmigen Linie sehen kann, die sich innerhalb eines cylindrischen Gefäßes oder eines Ringes zeigt, wenn derselbe vom Sonnenlicht oder dem Lichte einer Flamme beleuchtet wird. Die Fig. 272 erläutert die Entstehung der Brennlinien.

Drittes Capitel.

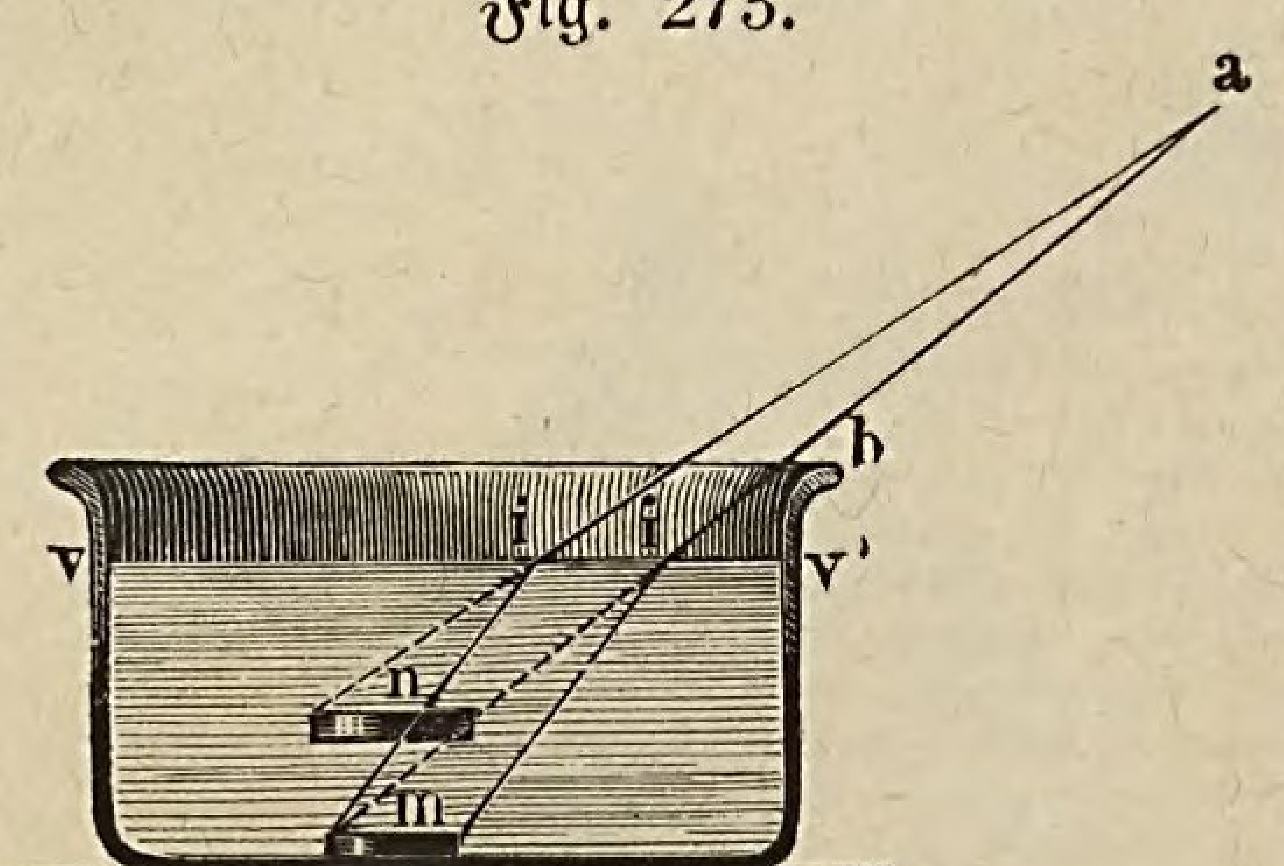
Dioptrik oder Brechung des Lichtes.

---

134 **Das Brechungsgesetz.** Unter Brechung versteht man die Ablenkung oder die Richtungsveränderung, welche ein Lichtstrahl erleidet, wenn er aus einem Mittel in ein anderes übergeht. Daß überhaupt eine solche Richtungsveränderung stattfindet, kann leicht durch folgenden Versuch dargethan werden.

Auf den Boden eines Gefäßes *vv'*, Fig. 273, lege man ein Geldstück oder sonst ein Metallstück *m* und halte das Auge *a* so, daß man nur noch den Rand desselben sieht, während das ganze Stück durch den Rand *b* des Gefäßes verdeckt ist. Wenn nun Wasser in das Gefäß gegossen wird, so scheint sich das Geldstück in dem Maaße zu erheben, in welchem das Niveau des Wassers im Gefäße steigt, bis endlich das ganze Geldstück sichtbar ist, und bei *n* zu liegen scheint, obgleich weder dieses, noch das Auge seinen Ort verändert. Das Licht gelangt jetzt nicht mehr in gerader Linie von *m* nach *a*, sondern es beschreibt die gebrochene Linie *mia*.

Fig. 273.



In Fig. 274 sei *ln* ein Lichtstrahl, welcher in *n* eine Wasserfläche trifft. Denken wir uns nun in *n* das Einfallsloth *pp* errichtet, so ist der Winkel *i*, welchen der einfallende Strahl mit demselben macht, der Einfallswinkel.

Beim Uebergang aus Luft in Wasser bleibt nun der Strahl in der Einfallsebene, d. i. in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth gelegten Ebene; im Wasser aber verfolgt er eine Richtung *ns*, die mit dem Einfallsloth einen Winkel *r* macht, welcher kleiner ist als der Einfallswinkel.

Der Winkel r, welchen der gebrochene Strahl ns mit dem verlängerten Einfallsloth np macht, wird der **Brechungswinkel** genannt.

Fig. 274.

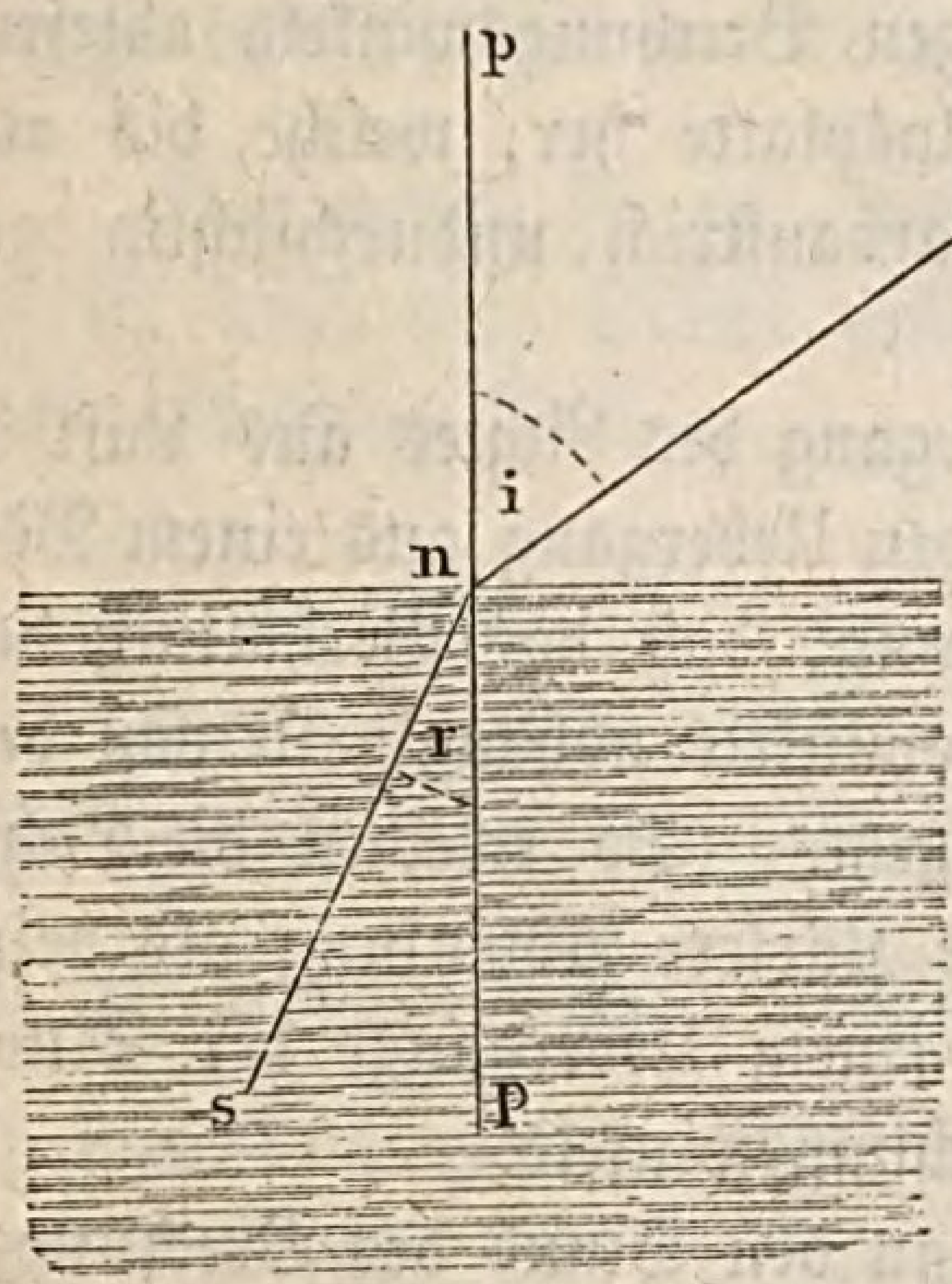
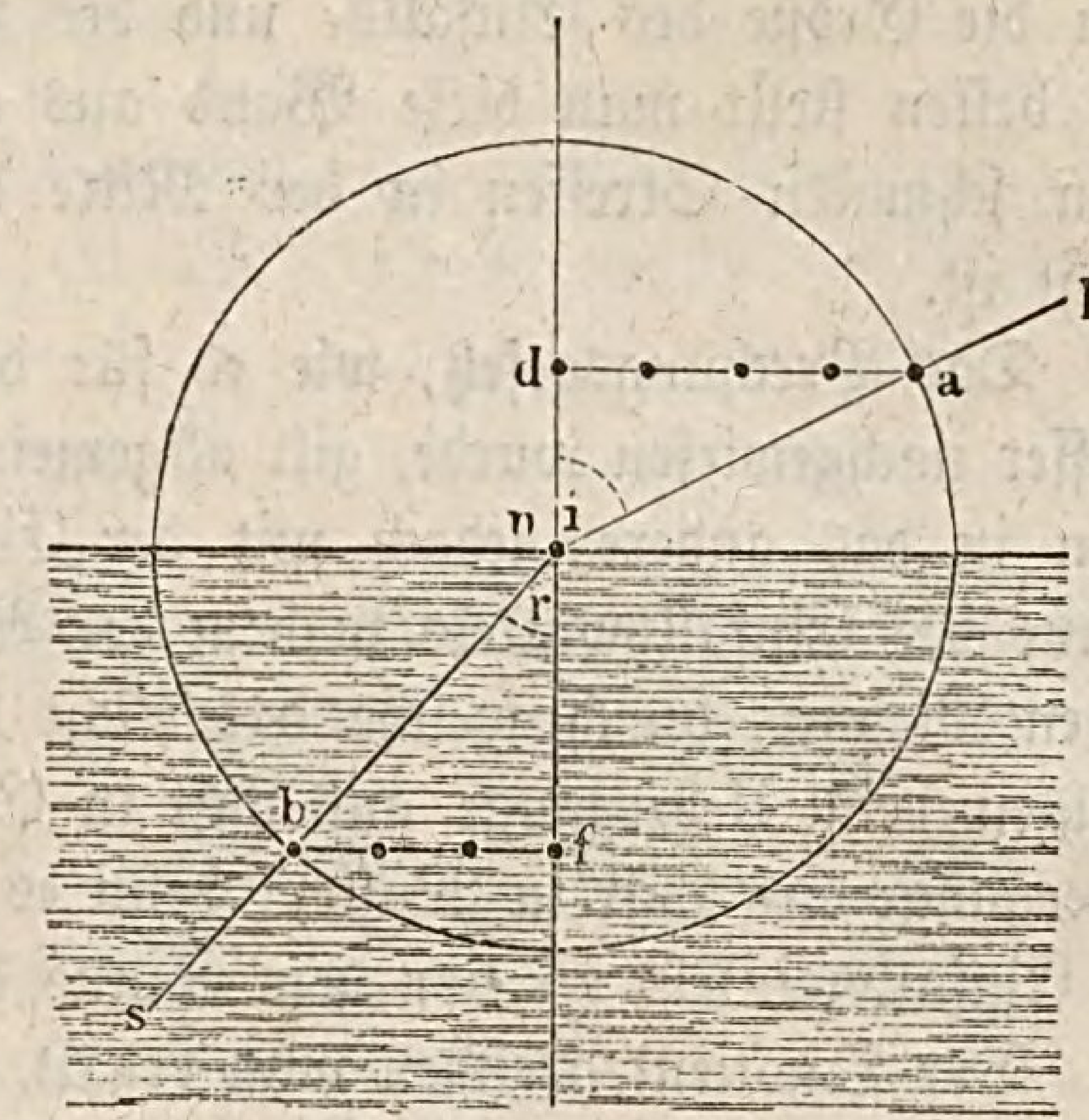


Fig. 275.

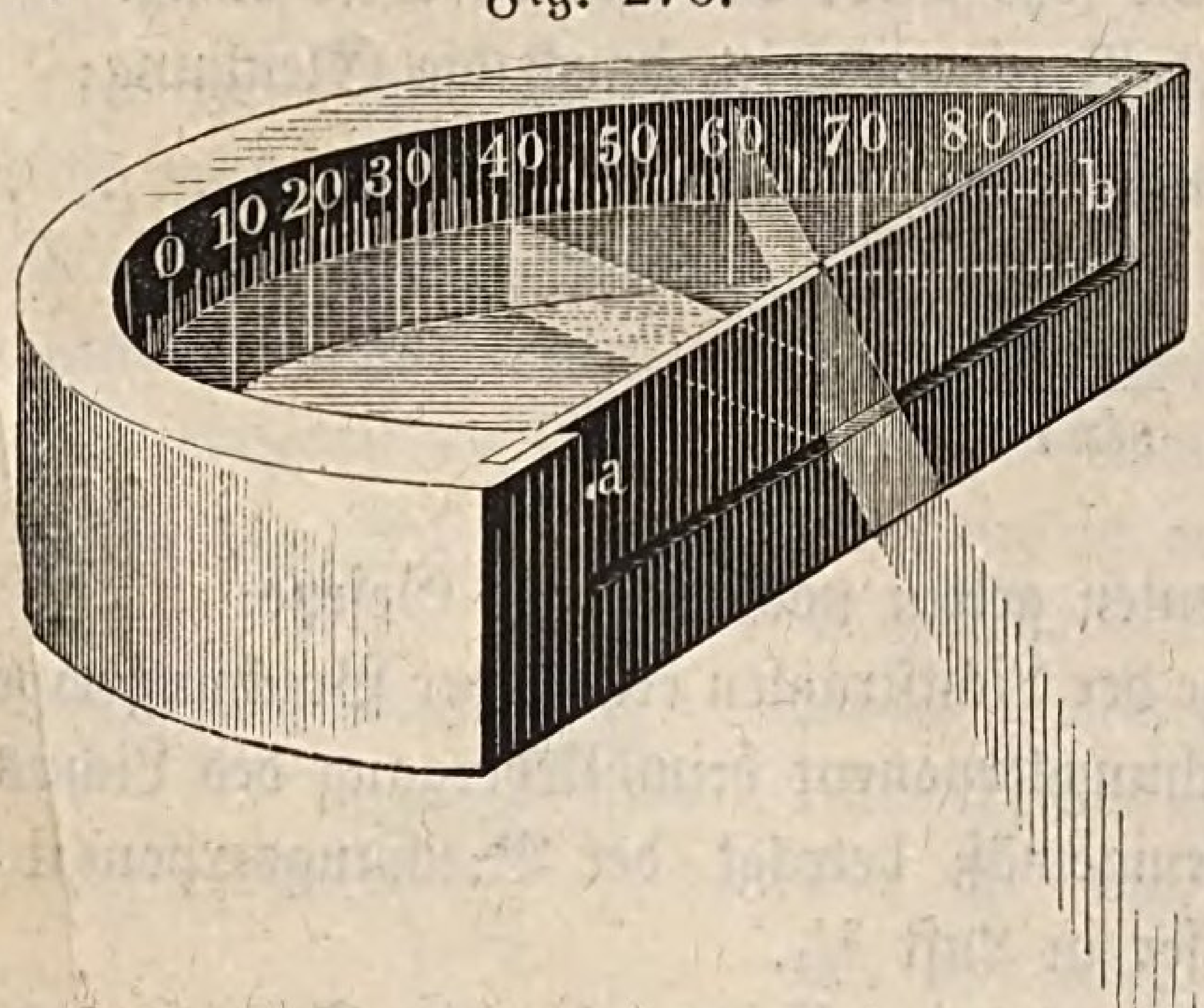


Zwischen dem Einfallswinkel und dem Brechungswinkel besteht nun eine Beziehung, welche durch Fig. 275 erläutert wird. Es sei ln ein Lichtstrahl, welcher bei n auf eine **Wasserfläche** trifft, ns sei der entsprechende gebrochene Strahl. Denkt man sich um n einen Kreis gezogen, so schneidet derselbe den einfallenden Strahl bei a, den gebrochenen bei b; fällt man nun von a ein Perpendikel ad, von b ein Perpendikel bf auf das Einfallsloth, so ist fb stets $^3/_4$ von ad.

Wenn der Radius des Kreises = 1 gesetzt wird, so sind dann die erwähnten Perpendikel gleich den **Sinus** der gegenüberliegenden Winkel; es ist ad der Sinus des Einfallswinkels i, bf aber ist der Sinus des Brechungswinkels r.

Durch die Einführung dieser Bezeichnung läßt sich nun das Brechungsgesetz für den Uebergang der Lichtstrahlen aus Luft in **Wasser** ganz einfach so ausdrücken:

Fig. 276.



Der Sinus des Einfallswinkels ist stets $^4/_3$ oder genauer 1,334 von dem Sinus des entsprechenden Brechungswinkels, oder in Zeichen:

$$\sin i = 1{,}334 \sin r.$$

Die Richtigkeit dieses Gesetzes läßt sich mit Hülfe des Apparats Fig. 276 nachweisen. Das Gefäß ist zur Hälfte seiner Höhe mit Wasser gefüllt. Ein Lichtstrahl nun, welcher durch einen Spalt in der

Mitte der undurchsichtigen Wand ab in das Gefäß eindringt, wird in der oberen wasserleeren Hälfte in gerader Richtung fortgehen, im Wasser aber gebrochen werden. An der Theilung der hinteren halbkreisförmigen Wand kann man die Größe des Einfalls- und des zugehörigen Brechungswinkels ablesen. Am besten stellt man diese Wand aus einer Glasplatte her, welche bis auf einen schmalen Streifen in der Mitte durch Farbanstrich undurchsichtig gemacht ist.

Das Brechungsgesetz, wie es für den Uebergang des Lichtes aus Luft in Wasser nachgewiesen wurde, gilt allgemein für jeden Uebergang aus einem Medium in das andere, jedoch mit der Einschränkung, daß das Verhältniß des Sinus des Einfallswinkels zu dem des Brechungswinkels abhängig ist von den beiden Medien, durch welche das Licht hindurchgeht. So erleiden die Lichtstrahlen beim Uebergange aus Luft in Glas eine stärkere Ablenkung als beim Uebergange aus Luft in Wasser; denn es ist bei jenem Uebergange der Sinus des Einfallswinkels $^3/_2$ von dem Sinus des Brechungswinkels.

Der Quotient, welchen man erhält, wenn man den Sinus des Brechungswinkels in den Sinus des Einfallswinkels dividirt, wird mit dem Namen des **Brechungsexponenten** bezeichnet. Nachstehend sind die Werthe der Brechungsexponenten einiger bekannten Stoffe für den Uebergang des Lichtes aus Luft angegeben:

Wasser	1,334	Flintglas	1,664
Alkohol	1,372	Schwefelkohlenstoff .	1,680
Benzol	1,500	Anisöl	1,811
Crownglas . . .	1,533	Diamant	2,470

Beim Uebergange aus Luft in Diamant ist also der Sinus des Einfallswinkels beinahe $2^1/_2$ mal so groß als der Sinus des Brechungswinkels; im Diamant erleiden also die Lichtstrahlen eine sehr starke Ablenkung; man sagt deshalb auch, der Diamant sei eine sehr **stark brechende Substanz**.

Allgemein läßt sich also das Brechungsgesetz durch die Gleichung:

$$\sin i = n \, . \sin r \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

oder

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

ausdrücken.

Ueber den Brechungsexponenten gelten noch folgende Gesetze:

1. Bei umgekehrtem Gange der Lichtstrahlen erhält der Brechungsexponent den reciproken Werth. Der Brechungsexponent beim Uebergang des Lichtes aus Luft in Wasser beträgt $^4/_3$; demgemäß beträgt der Brechungsexponent beim Uebergange des Lichtes aus Wasser in Luft $^3/_4$.

2. Ist n der Brechungsexponent beim Uebergange des Strahls aus Luft in das Mittel A, ferner m der Brechungsexponent beim Uebergange aus Luft in das Mittel B, so ist $\frac{m}{n}$ der Brechungsexponent beim Uebergange des Lichtes

aus A in B. Es sei z. B. $^4/_3$ der Brechungsexponent beim Uebergange aus Luft in Wasser, und $^3/_2$ der Brechungsexponent für den Uebergang des Strahls aus Luft in Glas, so ist $^3/_2 : {}^4/_3 = {}^9/_8$ der Brechungsexponent beim Uebergange des Strahls aus Wasser in Glas.

Der größte Werth, welchen der Einfallswinkel i beim Uebergang in ein stärker brechendes Mittel haben kann, ist 90^0, und da $\sin 90^0 = 1$, so hat man für diesen Fall

$$\sin r = \frac{1}{n}.$$

Der sich aus dieser Gleichung ergebende Werth von r ist der größte Brechungswinkel und wird deshalb der Gränzwinkel der Brechung genannt. Für die Brechung aus Luft in Wasser ist $n = {}^4/_3$, also $\frac{1}{n} = {}^3/_4 = 0{,}75$; nun ist aber $0{,}75 = \sin\,(48^0\ 35')$, mithin ist bei dem Uebergange des Lichtes aus Luft in Wasser $48^0\ 35'$ der größtmögliche Brechungswinkel; niemals kann ein Lichtstrahl, welcher aus Luft in Wasser tritt, nach der Brechung einen größeren Winkel mit dem Einfallslothe machen.

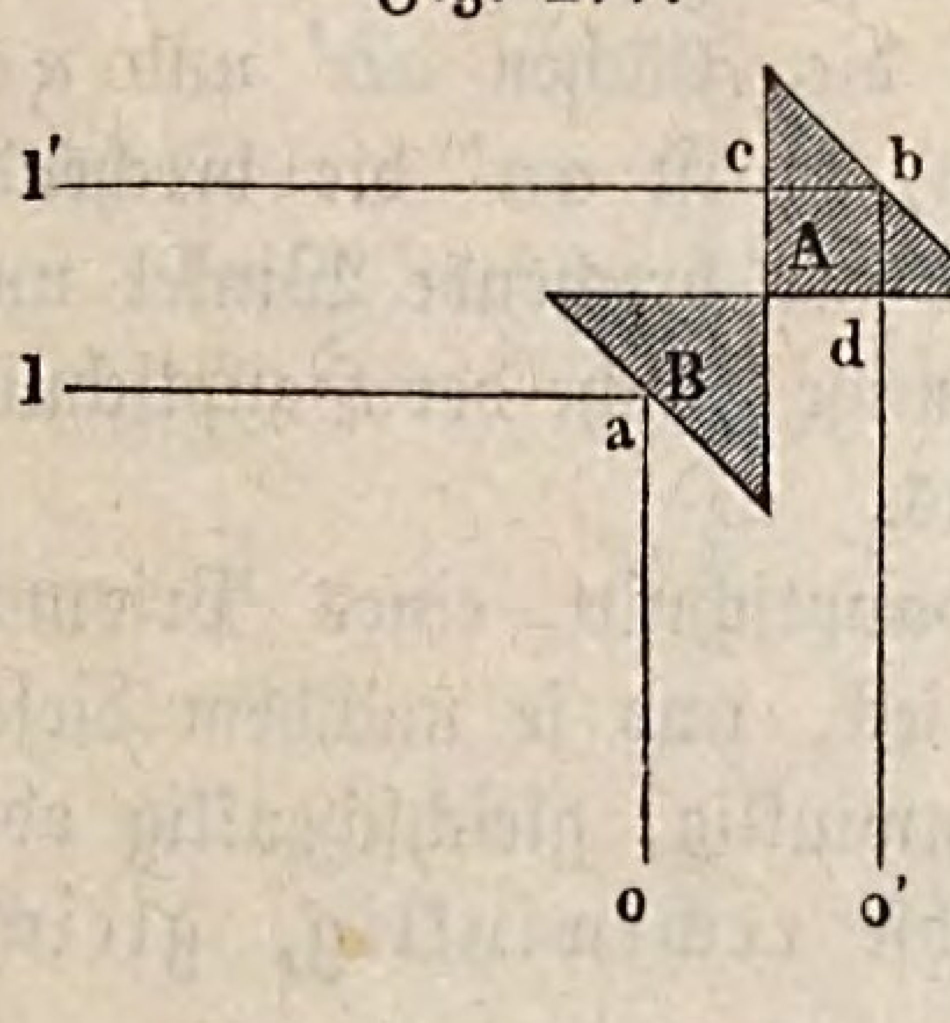
Wenn hingegen ein Lichtstrahl unter einem Einfallswinkel von $48^0\ 35'$ aus Wasser in Luft übergeht, so wird er in der Luft einen Winkel von 90^0 mit dem Einfallslothe bilden, d. h. er wird sich parallel der Trennungsfläche bewegen. Diejenigen Strahlen aber, welche im Wasser mit dem Einfallslothe einen Winkel bilden, der noch größer ist als der Gränzwinkel, können gar nicht mehr austreten, sondern werden an der Gränzfläche des Wassers vollständig reflectirt. Die totale Reflexion ist der einzige Fall einer Spiegelung auf durchsichtigen Körpern, bei welcher der Strahl fast nichts an seiner ursprünglichen Intensität verliert.

Für den Uebergang des Lichtes aus Glas in Luft ist der Gränzwinkel ungefähr 41^0.

Den Unterschied zwischen gewöhnlicher Glasreflexion und totaler Reflexion im Glase kann man am besten durch folgenden Versuch anschaulich machen.

Man stelle zwei rechtwinklige gleichseitige Glasprismen (siehe den folgenden Paragraphen) so zusammen, wie Fig. 277 zeigt. Fällt nun von einem etwas entfernten Gegenstand, etwa von einer brennenden Kerze, ein Lichtstrahl $l'c$ rechtwinklig auf die Vorderfläche des Prismas A auf, so wird er fast vollständig in die Glasmasse eintreten und bei b die Rückwand in einer Richtung treffen, welche einen Winkel von 45^0 mit dem Einfallsloth von b macht. Da nun aber der Gränzwinkel für Glas nahe 41^0 ist, so kann der Strahl bei b nicht in Luft eintreten, er wird vollständig reflectirt und deshalb sieht ein in o' befindliches Auge ein sehr lichtstarkes Bild der Kerze, während

Fig. 277.



das Bild der Kerze, welches durch die Reflexion der Lichtstrahlen bei a auf der Vorderfläche des Prismas B entsteht, ungleich lichtschwächer ist, weil ein Theil der in der Richtung la einfallenden Strahlen in die Glasmasse eindringt und nur ein Theil derselben bei a zurückgeworfen wird.

135 **Brechung des Lichtes in Prismen.** Wenn ein Lichtstrahl aus einem Mittel in ein anderes und aus diesem wieder in das erste übergeht, so ist der austretende Strahl $n'l'$, Fig. 278, dem eintretenden nl parallel, wenn die beiden Gränzflächen von B einander parallel sind; ist dies jedoch nicht der Fall, so wird die Richtung des austretenden Strahls mehr oder weniger von der des eintretenden abweichen, Fig. 279. Mit Hülfe des Brechungsgesetzes ist es leicht, in jedem bestimmten Falle der Art den Weg des Lichtstrahls zu finden.

Fig. 278.

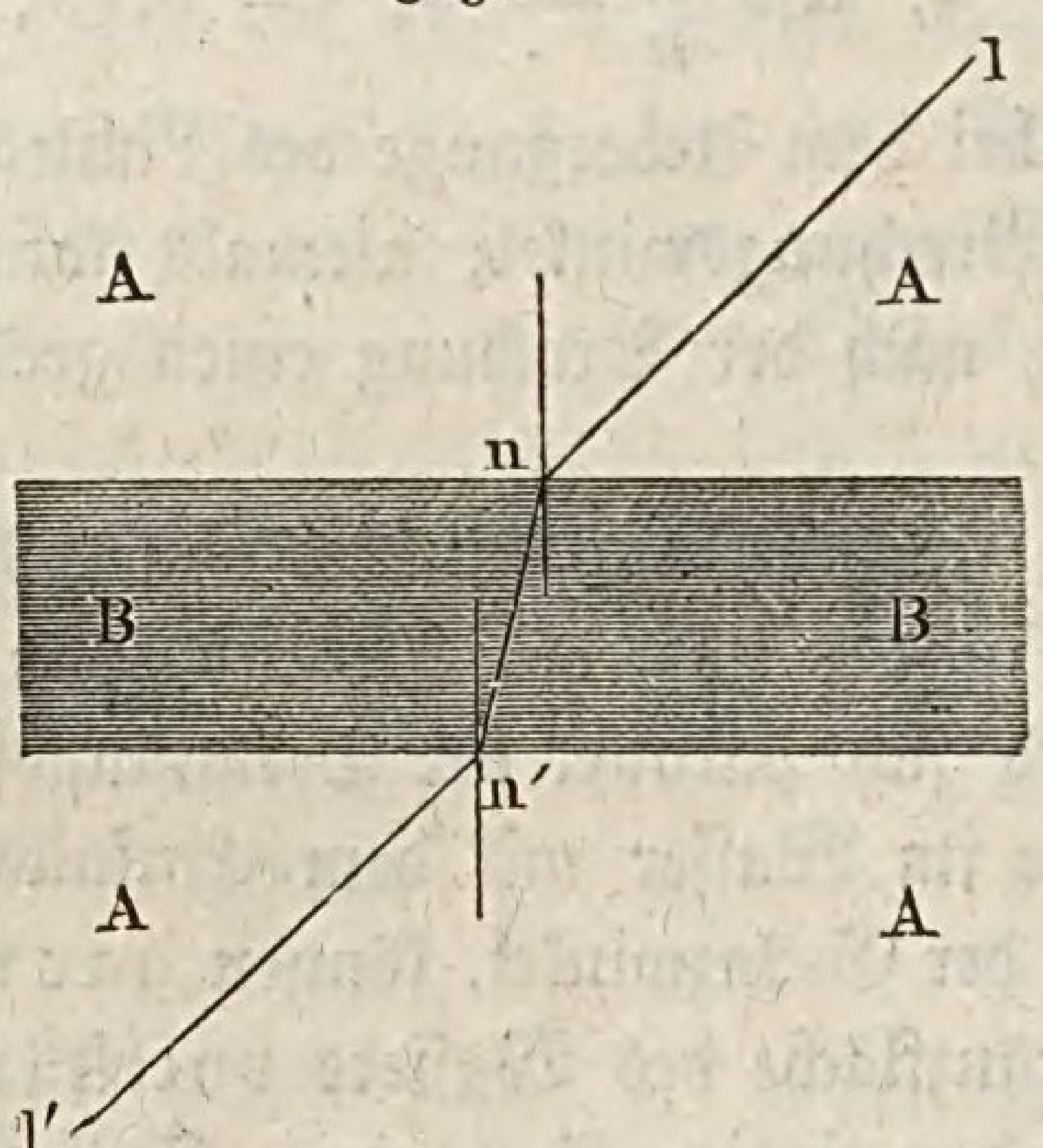
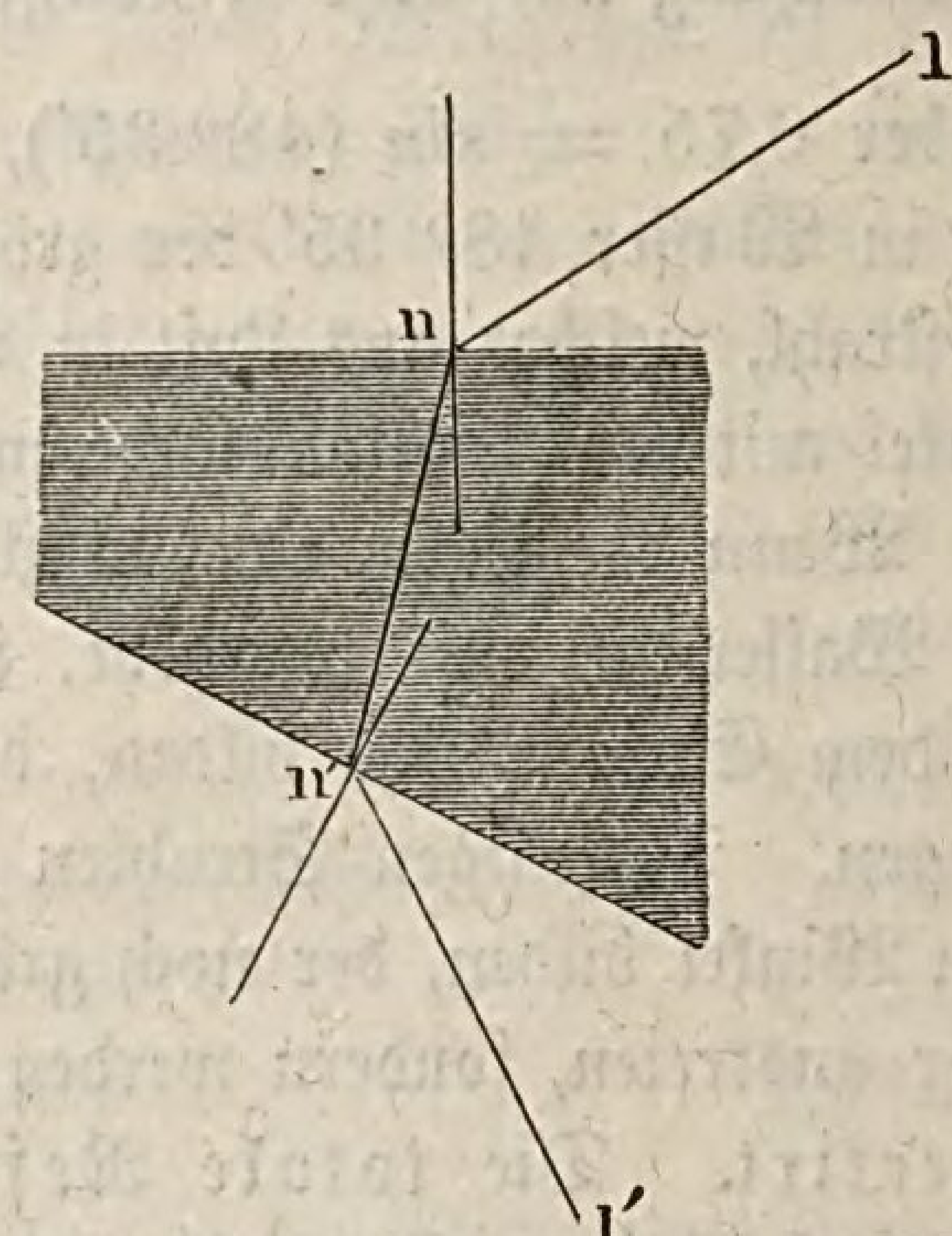


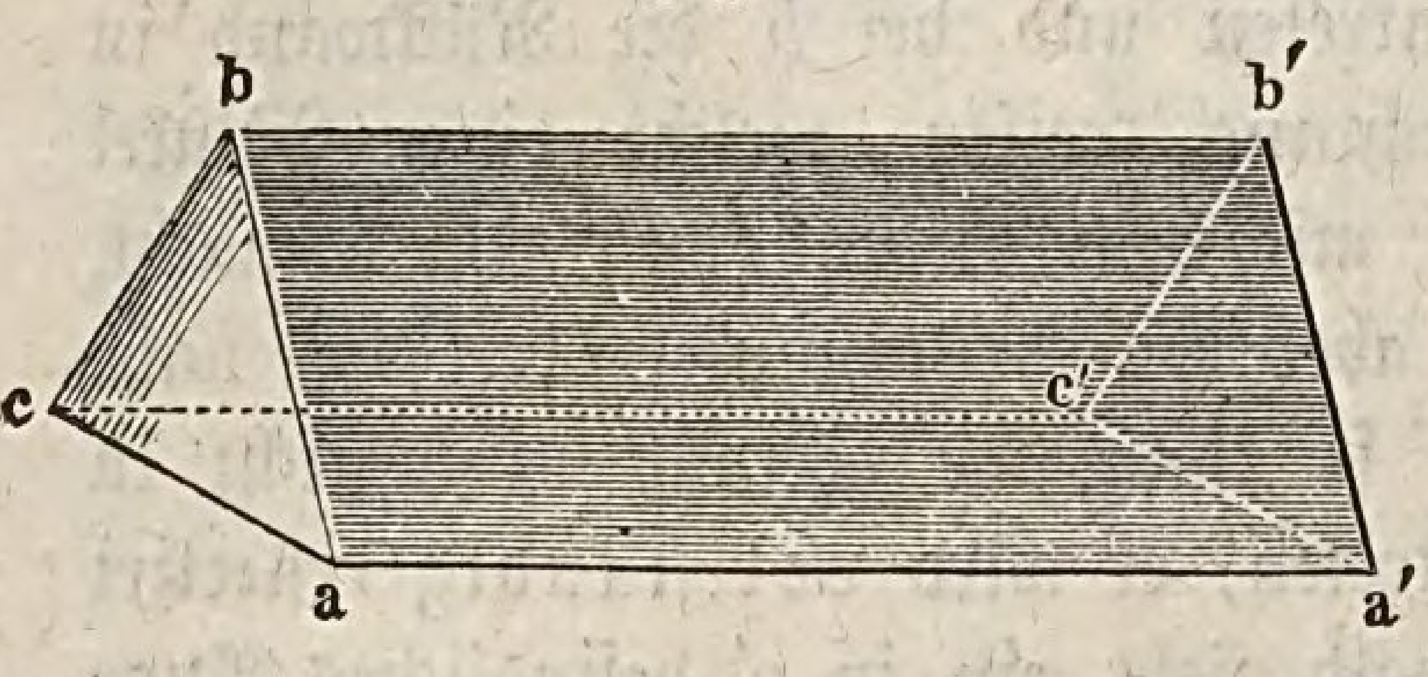
Fig. 279.



In der **Optik** nennt man jedes durchsichtige Mittel, welches von zwei ebenen, gegen einander geneigten Flächen begränzt ist, ein **Prisma**. Die Linie, in welcher sich die beiden Gränzflächen schneiden oder doch schneiden würden, wenn sie hinreichend verlängert wären, wird die **Kante** des Prismas genannt. Der Winkel, welchen die brechenden Flächen des Prismas mit einander machen, heißt der brechende Winkel des Prismas. **Hauptschnitt** nennt man den Durchschnitt des Prismas mit einer auf seiner Kante rechtwinkligen Ebene.

Gewöhnlich wendet man Prismen an, welche durch drei rechtwinklige Flächen $abb'a'$, $bcb'c'$ und $cac'a'$, Fig. 280, begränzt sind. Wenn das Licht durch die Flächen ab' und ac' hindurchgeht, so ist aa' die brechende Kante, bac der brechende Winkel und die gleichnamige Fläche der Hauptschnitt des Prismas.

Fig. 280.



Der Hauptschnitt eines Prismas ist ein Dreieck, und je nachdem dieses Dreieck rechtwinklig, gleichschenklig oder gleichseitig ist, nennt man auch das Prisma selbst rechtwinklig, gleich-

schenklig oder gleichseitig. So z. B. zeigt die Fig. 277 die Hauptschnitte zweier rechtwinkliger, gleichschenkliger Prismen, während Fig. 282 den Hauptschnitt eines gleichseitigen Prismas zeigt.

Fig. 281.

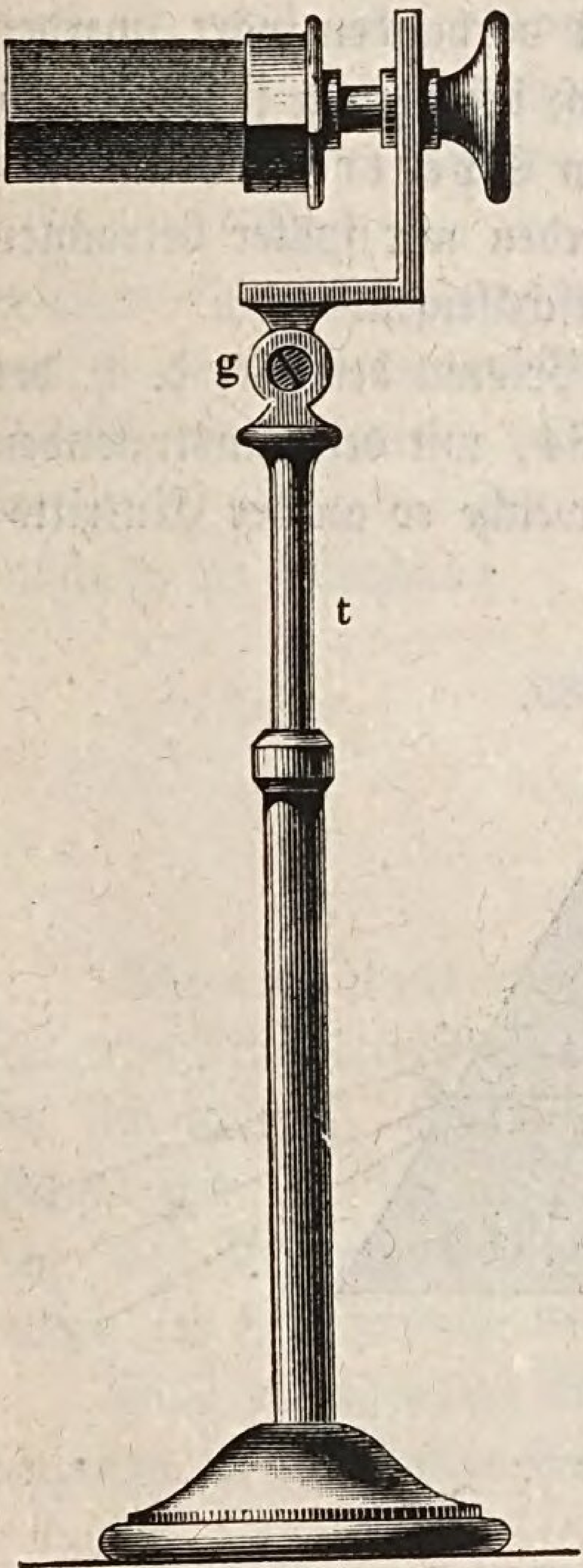
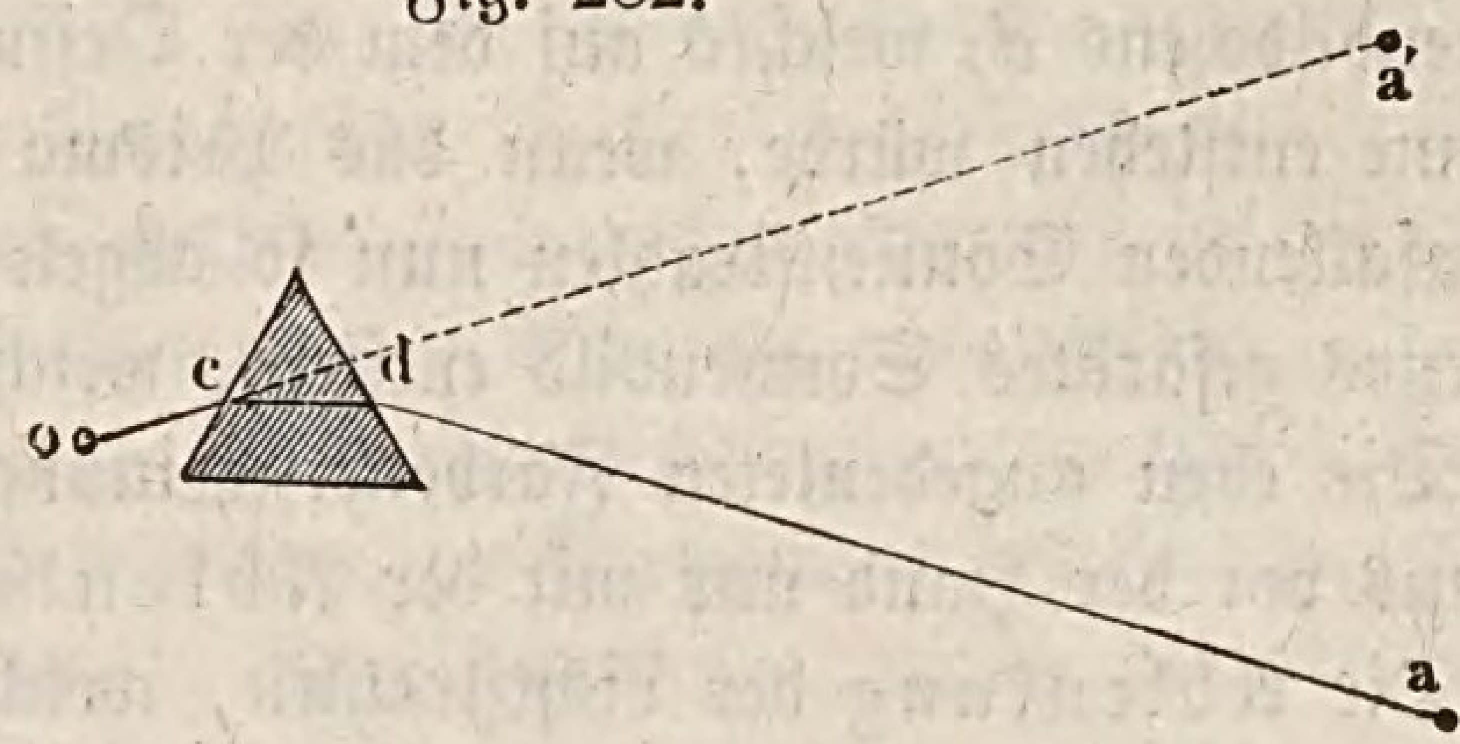


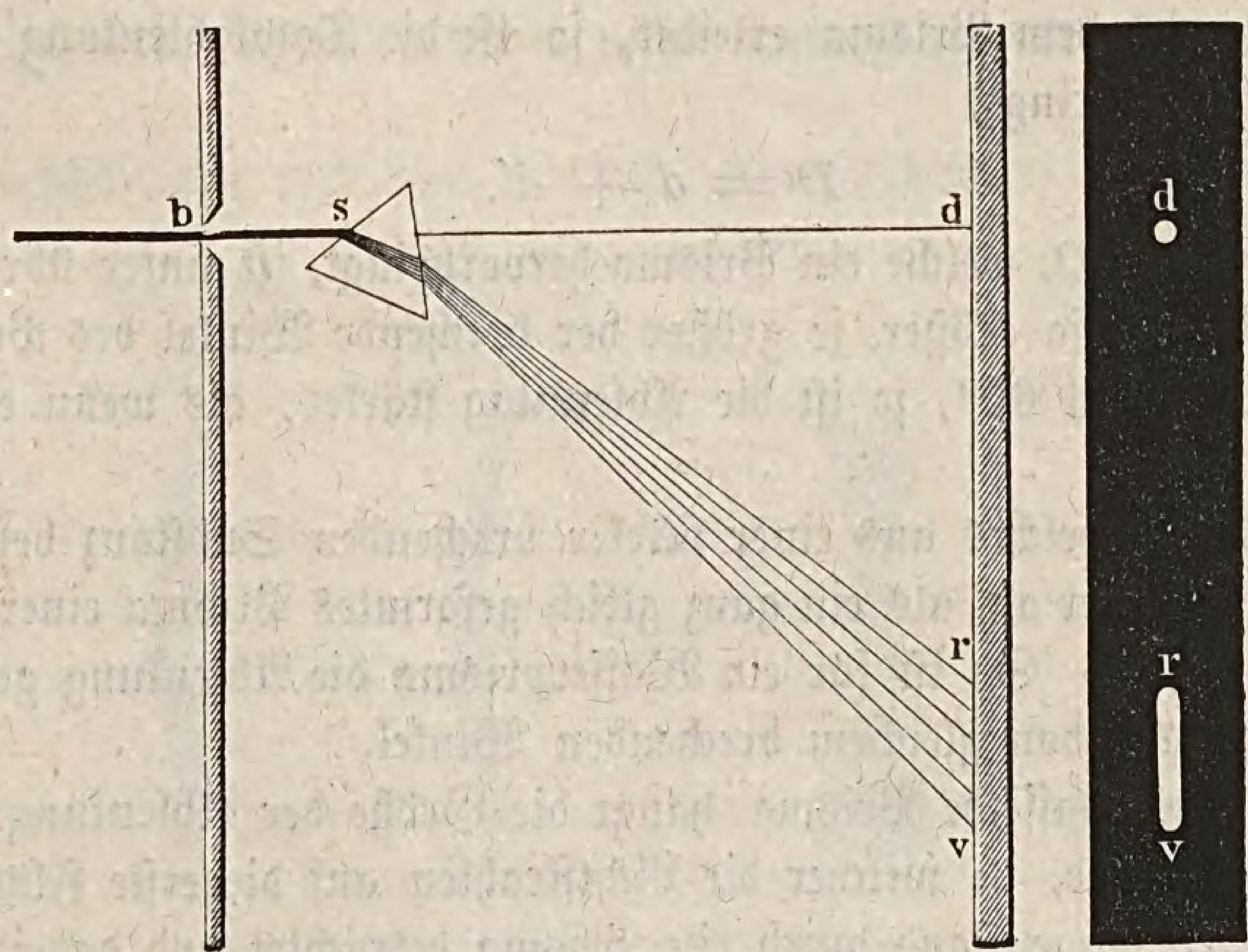
Fig. 282.



Gewöhnlich befestigt man die Prismen auf einem messingenen Stativ, Fig. 281. Durch Auf- oder Niederschieben des Stäbchens *t* in der Röhre, in welcher es steckt, kann man das Prisma höher oder tiefer stellen, und ihm mittelst des Charniers bei *g* jede beliebige Stellung geben.

Wenn von irgend einem Gegenstande *a*, Fig. 282, etwa von einer brennenden Kerze ein Lichtstrahl in der Richtung *ad* auf ein Prisma fällt und in der Richtung *co* austritt, so wird ein in *o* befindliches Auge die Flamme *a* in der Richtung *oa'* sehen; der Gegenstand erscheint also, wenn man ihn durch das Prisma betrachtet, nach der Seite der brechenden Kante hin abgelenkt. Das abgelenkte Bild *a'* zeigt sich aber außerdem noch auf eine eigenthümliche, später näher zu besprechende Weise gefärbt.

Fig. 283.



Wenn Sonnenstrahlen durch eine kleine Oeffnung in der Richtung *bd*, Fig. 283 (a. v. S), in ein dunkles Zimmer treten, und nach dem Durchgang durch ein Prisma auf einem weißen Schirme aufgefangen werden, so beobachtet man ebenfalls eine Ablenkung und eine Farbenerscheinung. Statt des weißen Sonnenbildchens *d*, welches auf dem der Oeffnung *b* gegenüberstehenden weißen Schirme entstehen würde, wenn das Prisma *s* nicht vorhanden wäre, werden die einfallenden Sonnenstrahlen nun so abgelenkt, daß bei *rv* ein in die Länge gezogenes gefärbtes Sonnenbild entsteht, welches man Spectrum nennt.

Die eben angedeuteten Farbenerscheinungen werden wir später betrachten und uns vor der Hand nur mit der Ablenkung beschäftigen.

Die Ablenkung der Lichtstrahlen, welche ein Prisma bewirkt, d. h. der Winkel, welchen der eintretende Strahl *ln*, Fig. 284, mit dem austretenden Strahl *n'l'* macht, ist die Summe der Ablenkungen, welche er an der Eintritts-

Fig. 284.

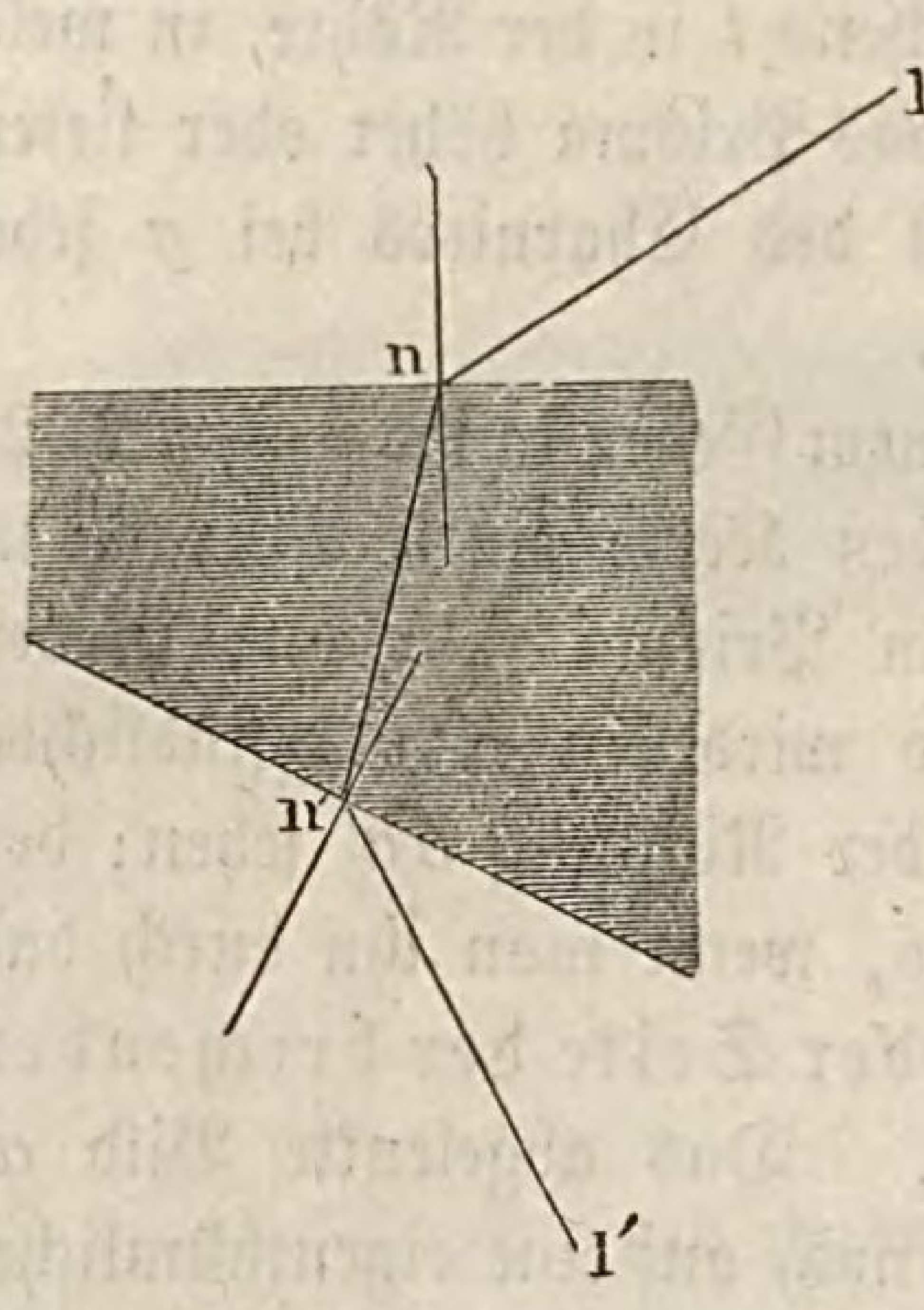
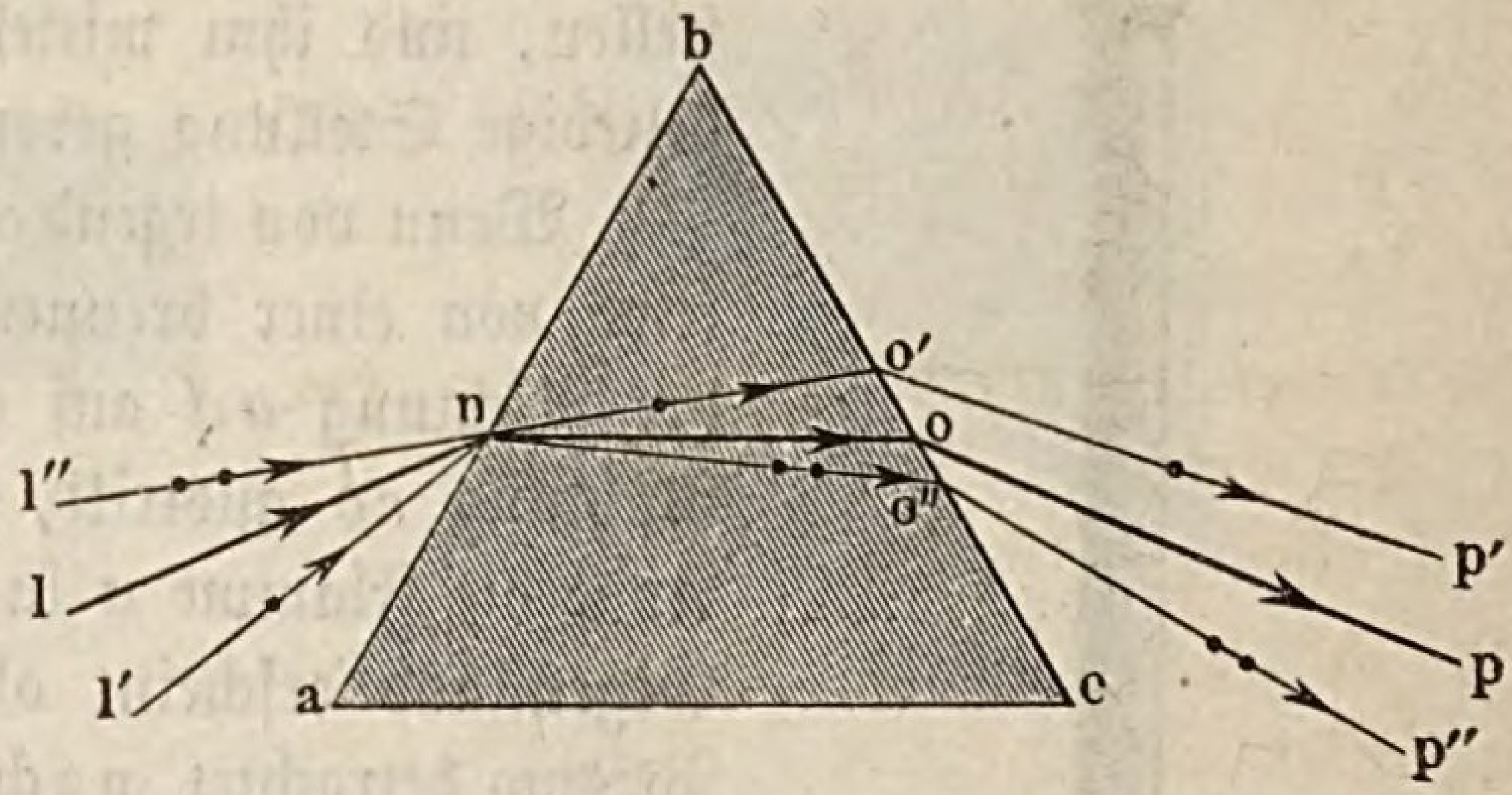


Fig. 285.



und an der Austrittsfläche erleidet. Bezeichnen wir also mit *d* die Ablenkung, welche der Strahl in *n* beim Eintritt, mit *d'* die Ablenkung, welche er in *n'* beim Austritt aus dem Prisma erleidet, so ist die Totalablenkung *D*, welche das Prisma hervorbringt,

$$D = d + d'.$$

Die Totalablenkung *D*, welche ein Prisma hervorbringt, ist unter übrigens gleichen Umständen um so größer, je größer der brechende Winkel des Prismas ist. Beträgt dieser Winkel 60°, so ist die Ablenkung stärker, als wenn er nur 45° betrüge.

Ein Prisma, welches aus einer stärker brechenden Substanz besteht, lenkt die Lichtstrahlen stärker ab, als ein ganz gleich geformtes Prisma einer schwächer brechenden Substanz. So ist für ein Wasserprisma die Ablenkung geringer als für ein Glasprisma von gleichem brechenden Winkel.

Für ein und dasselbe Prisma hängt die Größe der Ablenkung auch noch von der Richtung ab, in welcher die Lichtstrahlen auf die erste Fläche treffen. Wenn man einen Gegenstand durch ein Prisma betrachtet und dabei dieses um

seine Axe dreht, so sieht man, wie das Bild sich bald weiter von der Stelle des Gegenstandes entfernt, bald sich ihm wieder nähert. Die kleinste Ablenkung findet Statt, wenn die Strahlen das Prisma symmetrisch durchlaufen, d. h. wenn sie innerhalb des Prismas gleiche Winkel mit der Eintritts- und mit der Austrittsfläche bilden, wie dies z. B. für den Strahl $lnop$, Fig. 285, der Fall ist. Die Ablenkung dieses Lichtstrahls ist kleiner als die des Strahles $l''n$, welcher in der Richtung $o''p''$ austritt, und auch kleiner als die Ablenkung des Strahles $l'n$, welcher das Prisma in der Richtung $o'p'$ verläßt.

Das Minimum der Ablenkung, welche die Lichtstrahlen in einem Prisma erleiden, ist wichtig, weil man sich desselben zur Berechnung des Brechungsexponenten der Prismensubstanz bedient. Bezeichnen wir mit g den brechenden Winkel des Prismas, mit D das Minimum der Ablenkung, welche es hervorbringt, so haben wir zur Bestimmung des Brechungsexponenten n der Prismensubstanz die Gleichung

$$n = \frac{\sin \frac{D + g}{2}}{\sin \frac{g}{2}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1)$$

Wenn der brechende Winkel des Prismas klein ist, so bleibt die Größe der Ablenkung sehr nahe dieselbe, wenn auch die Richtung des einfallenden Strahles sich ändert. Es ist dies zum Verständniß der Theorie der Linsen von Wichtigkeit.

Um Prismen aus Flüssigkeiten zu bilden, wendet man Hohlprismen an, deren Seitenwände durch geschliffene Glasplatten gebildet sind.

Eine eingehendere Besprechung der Brechung des Lichtes in Prismen findet man in den entsprechenden Paragraphen des Supplementbandes.

Sphärische Linsen. Linsen nennt man durchsichtige, durch zwei 136
krumme Oberflächen begränzte Körper, welche die Eigenschaft haben, ein durch sie hindurchgehendes Strahlenbündel mehr convergent, oder mehr divergent zu machen.

Wir beschäftigen uns hier nur mit sphärischen Linsen, d. h. mit sol-

Fig. 286.

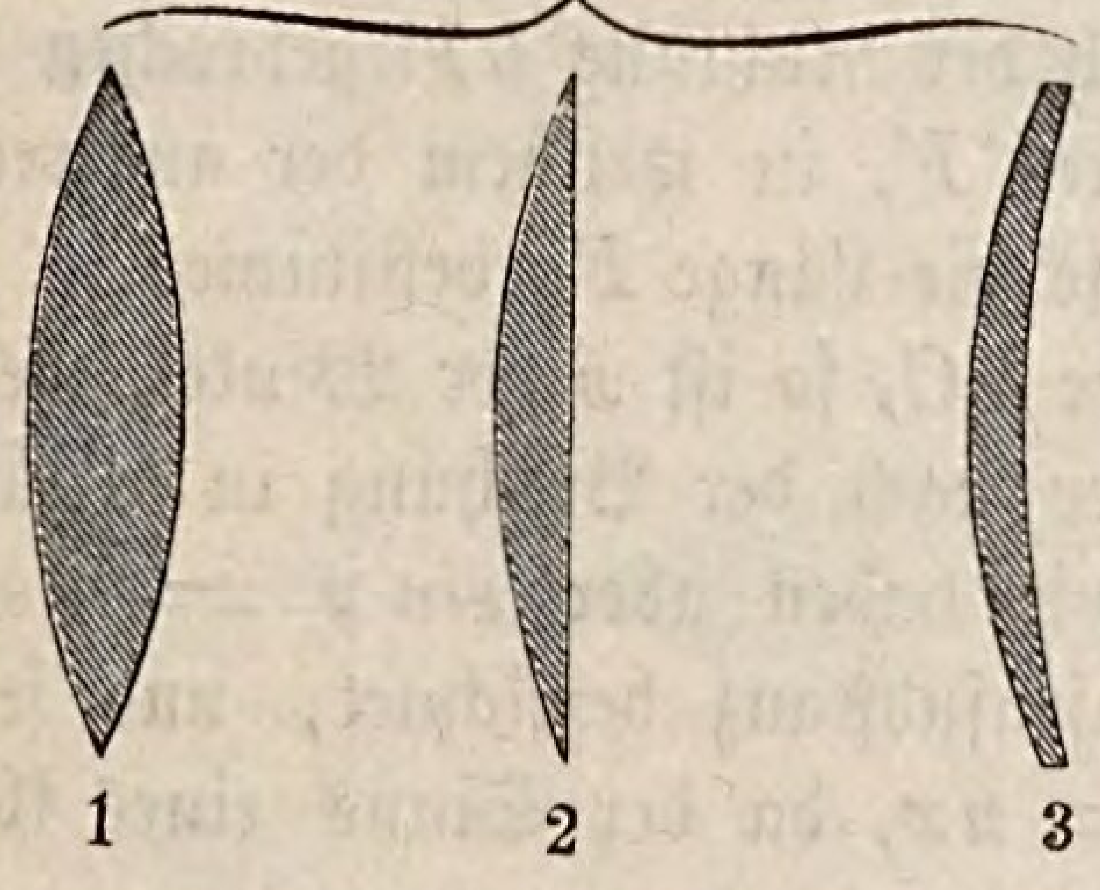
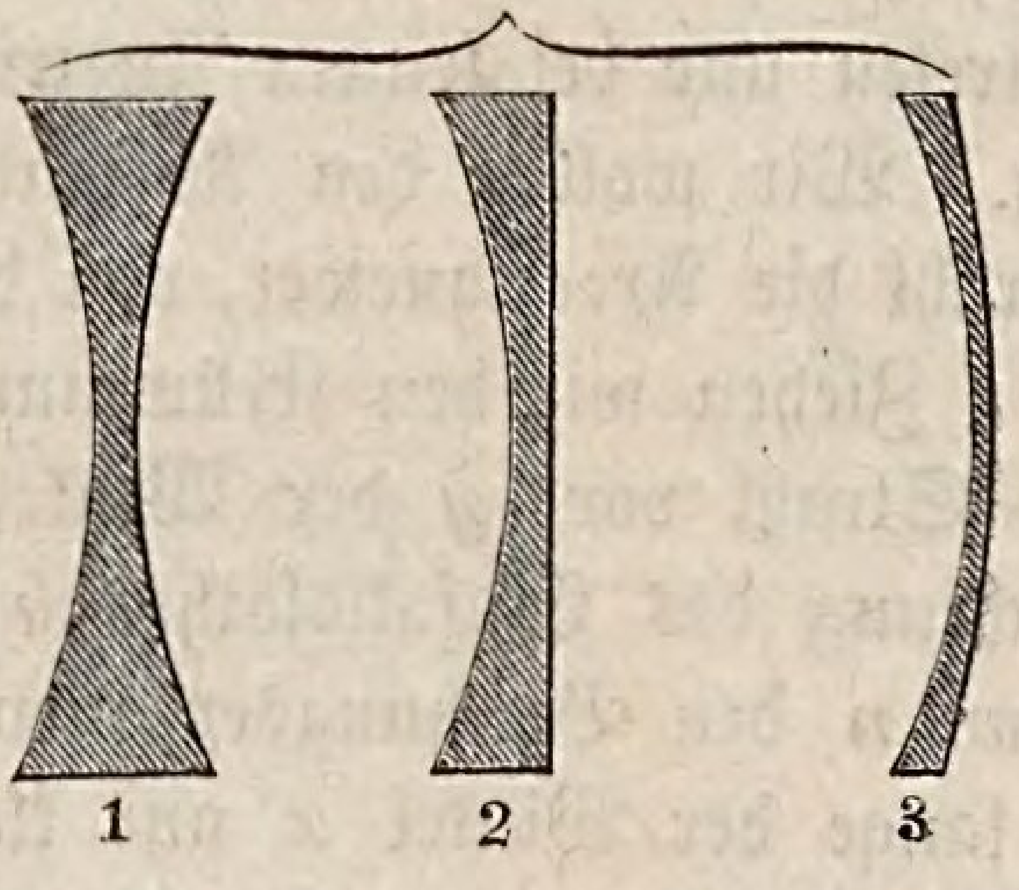


Fig. 287.



chen, deren Gränzflächen Stücke von Kugeloberflächen sind, weil diese allein zu optischen Instrumenten verwendet werden.

Man unterscheidet zwei Hauptarten von Linsen, nämlich:

1. Convexlinsen, welche in der Mitte dicker sind als am Rande, und

2. Concavlinsen, bei welchen das Umgekehrte stattfindet.

Fig. 286 (a. v. S.) stellt drei verschiedene Formen von Convexlinsen oder, wie man sie auch nennt, von Sammellinsen dar. Nr. 1 ist eine biconvexe, Nr. 2 eine planconvexe und Nr. 3 endlich eine concav-convexe Linse.

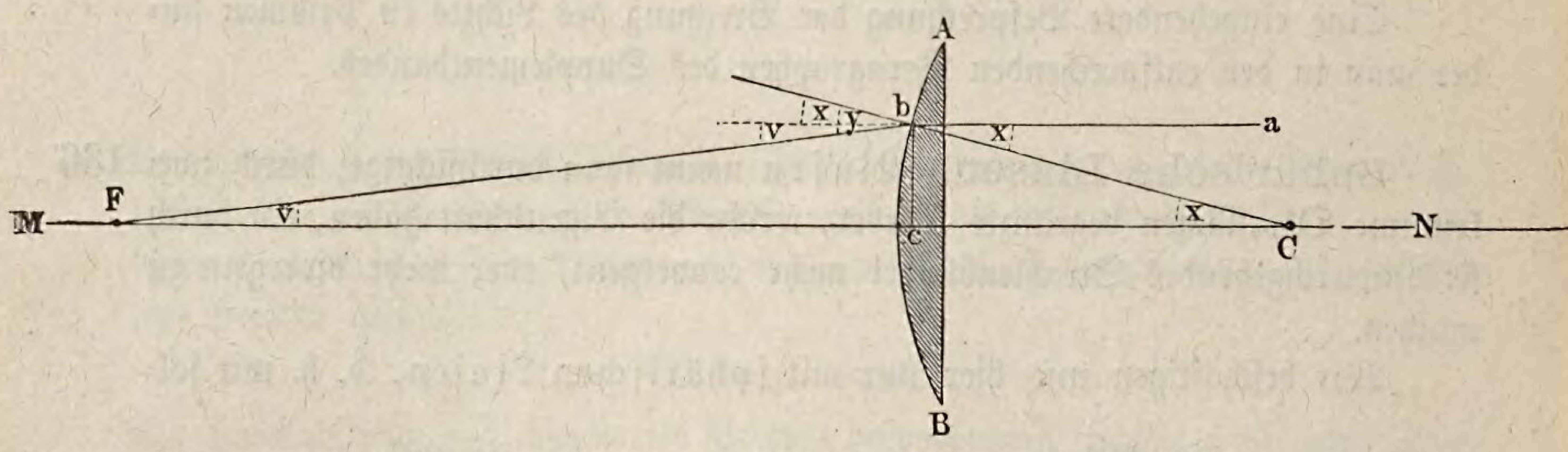
Fig. 287 (a. v. S.) stellt drei verschiedene Formen der Concav- oder Zerstreuungslinsen dar, nämlich Nr. 1 eine biconcave, Nr. 2 eine planconcave und Nr. 3 eine convexconcave Linse. — Die Formen Nr. 3 in Fig. 286 und Fig. 287 werden auch Menisken genannt.

Die gerade Linie, welche die Mittelpunkte der beiden Kugeloberflächen einer Linse verbindet, ist die Axe der Linse. Bei den planconvexen und planconcaven Linsen ist die Axe das von dem Krümmungmittelpunkte der gewölbten Fläche auf die ebene Fläche gefällte Perpendikel. — Zu optischen Zwecken werden nur Linsen angewendet, welche aus Glas verfertigt sind; im Folgenden wird deshalb auch nur von den Glaslinsen gehandelt werden.

137 **Convexlinsen.** Um die wichtigsten Sätze über die Wirkung der Convexlinsen abzuleiten, wollen wir von der Betrachtung des einfachsten Falles, nämlich der planconvexen Linsen, Fig. 286 Nr. 2, ausgehen.

Auf die ebene Seite AB, Fig. 288, einer solchen Linse falle ein Licht-

Fig. 288.



strahl ab parallel mit der Axe MN, so wird er ungebrochen in die Glasmasse eintreten und bei seinem Austritte in b nach der Richtung bF gebrochen werden. Wir wollen den Abstand des Punktes F, in welchem der austretende Strahl die Axe schneidet, von der Linse, also die Länge Fc bestimmen.

Ziehen wir den Krümmungshalbmesser bC, so ist x der Winkel, welchen der Strahl vor, y der Winkel, welchen er nach der Brechung in b mit der Richtung des Einfallslothes bC macht; wir haben aber $\sin y = n \sin x$, wenn n den Brechungsexponenten der Linsensubstanz bezeichnet, und ferner, so lange der Winkel x nur klein ist, $y = nx$, da der Sinus eines kleinen Winkels seinem Bogenmaaße gleich ist.

Der Winkel v, welchen der austretende Strahl bF mit der Axe macht, ist nun offenbar gleich $y - x$. Nehmen wir n, den Brechungsexponenten des Glases, gleich $^3/_2$, so ist

$$y = nx = {}^3/_2\, x$$

$$\text{und } v = y - x = (n - 1)\, x = \frac{1}{2}\, x.$$

Nun aber verhält sich in dem Dreieck FbC, da die Winkel v und x nur klein sind:

$$Fb : Cb = x : v = 1 : (n - 1) = 1 : {}^1/_2$$

und hieraus ergiebt sich, wenn man den Krümmungsradius Cb der Linse gleich r setzt:

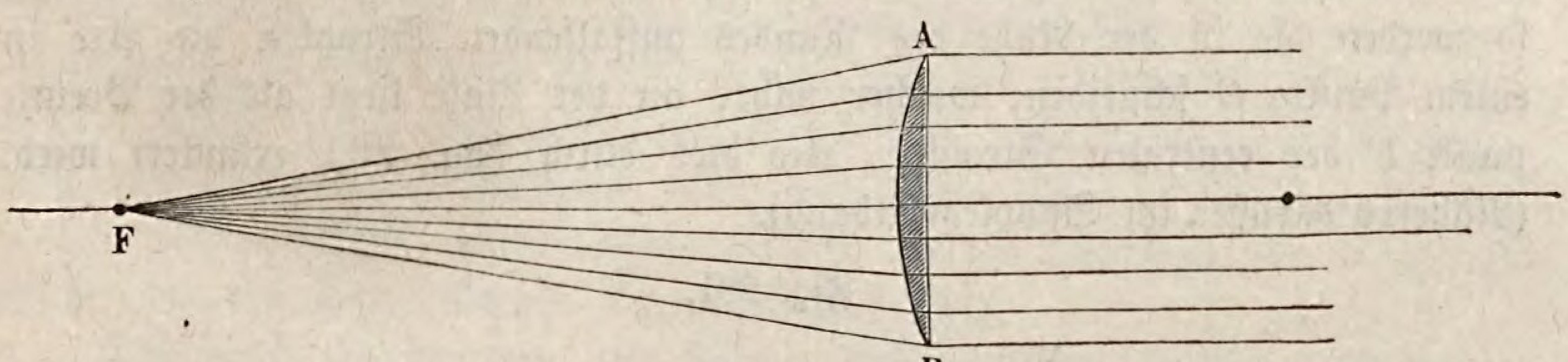
$$Fb = \frac{r}{n - 1} = 2\,r.$$

Wenn man die Dicke der Linse als unbedeutend vernachlässigt, kann man dieses Resultat auch so aussprechen: daß für $n = 1{,}5$ der Punkt F doppelt soweit von der Linse entfernt ist, als der Krümmungsmittelpunkt C.

Bei dieser Entwickelung ist kein specieller Werth von x zu Grunde gelegt worden, die Lage des Punktes F bleibt also dieselbe, wie sich x auch innerhalb der Gränze ändern mag, bis zu welcher man ohne merklichen Fehler den Sinus mit dem zugehörigen Bogen verwechseln kann. Mit anderen Worten lautet das eben abgeleitete Resultat:

Wenn auf eine planconvexe Glaslinse, Fig. 289, ein Bündel Lichtstrahlen parallel mit der Axe einfällt, so werden sie in

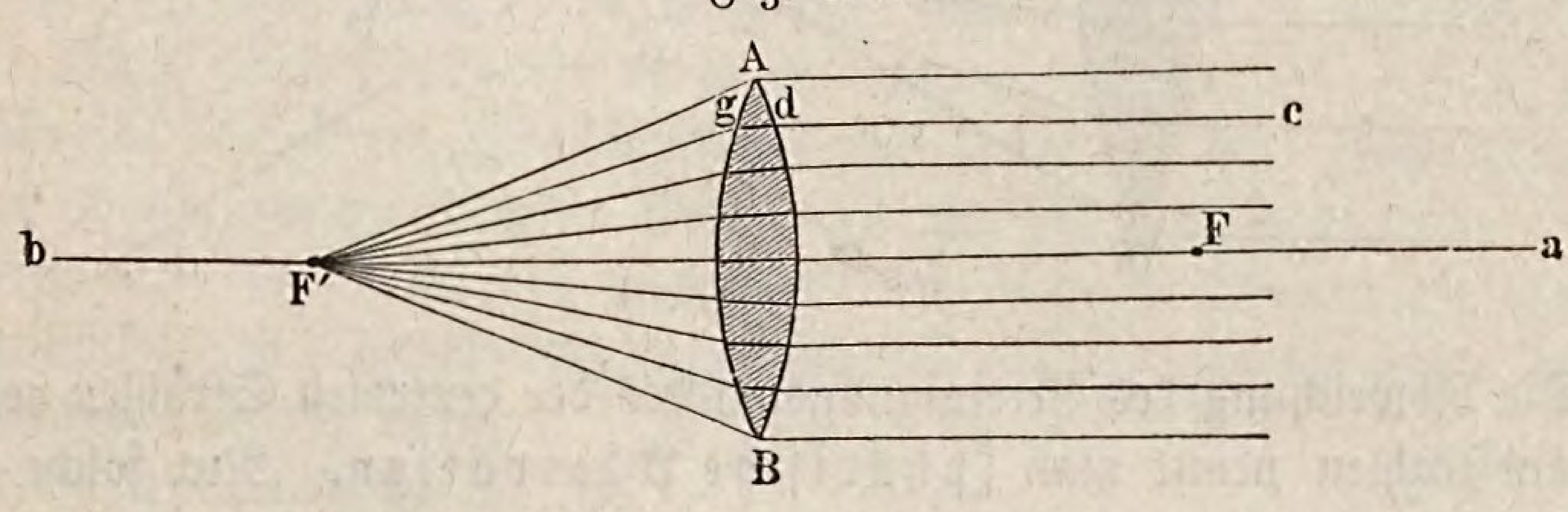
Fig. 289.



einem Punkte F vereinigt, welcher um den doppelten Krümmungshalbmesser der gewölbten Seite von dem Glase absteht.

Eine biconvexe Linse kann als eine Combination zweier planconvexen betrachtet werden, welche mit ihren flachen Seiten an einander gelegt sind.

Fig. 290.



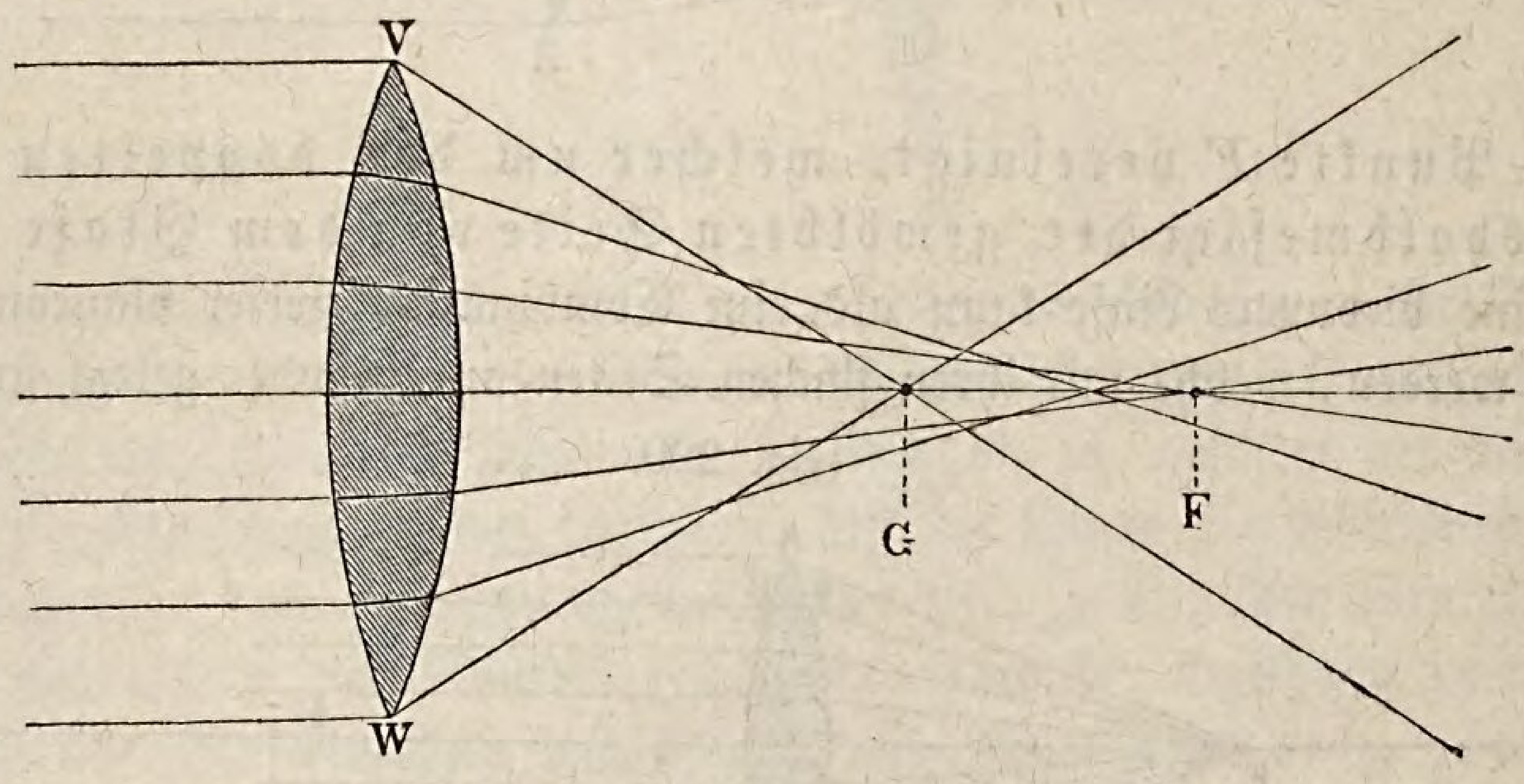
Eine biconvexe Linse, deren beide Flächen den Krümmungshalbmesser r haben, wird aber die Lichtstrahlen doppelt so stark von ihrer Richtung ablenken, als eine planconvexe Linse, deren gewölbte Seite denselben Krümmungshalbmesser r hat. Wenn also eine gleichgewölbte biconvexe Linse AB, Fig. 290 (a. v. S.), von einem Bündel Lichtstrahlen getroffen wird, welches parallel mit der Linsenaxe einfällt, so werden sie in einem Punkte F' vereinigt, welcher nur halb so weit vom Glase absteht als im vorigen Fall, und daher mit dem entsprechenden Krümmungsmittelpunkt der Linse zusammenfällt.

Der Punkt F', in welchem durch eine Linse ein parallel mit der Axe auf dieselbe fallendes Strahlenbündel vereinigt wird, heißt der Focus oder Brennpunkt der Linse; der Abstand des Brennpunktes von der Linse heißt die Focaldistanz oder die Brennweite der Linse.

Die obigen Bestimmungen der Brennweite gelten nur für Linsen, deren Substanz den Brechungsexponenten $^3/_2$ oder 1,5 hat. Der Brechungsexponent der meisten Glassorten ist aber etwas größer, nämlich 1,52 bis 1,66, folglich wird auch die Brennweite der Glaslinsen etwas kleiner sein, als eben angegeben wurde. Für eine Wasserlinse würde die Brennweite größer, für eine Edelsteinlinse würde sie kleiner sein, als für eine gleichgeformte Glaslinse.

Der Satz, daß alle parallel mit der Axe auf die Linse fallenden Strahlen in einem Punkte vereinigt werden, ist unter der Voraussetzung abgeleitet worden, daß die Krümmung der Linse von der Mitte bis b, also der Winkel x, Fig. 289, selbst für die am Rand der Linse einfallenden Strahlen noch klein genug ist, um den Sinus derselben mit dem entsprechenden Bogen zu verwechseln. Ist aber die Linse so stark gewölbt, daß diese Bedingung nicht mehr erfüllt ist, so werden die in der Nähe des Randes auffallenden Strahlen die Axe in einem Punkte G schneiden, welcher näher an der Linse liegt als der Brennpunkt F der centralen Strahlen, wie dies durch Fig. 291 erläutert wird. (Näheres darüber im Supplementband).

Fig. 291.



Die Abweichung des Vereinigungspunktes der centralen Strahlen von dem der Randstrahlen nennt man sphärische Aberration. Nur solche Linsen

welche so schwach gewölbt sind, daß ihre sphärische Aberration verschwindend klein ist, können reine Bilder geben und zu optischen Instrumenten verwendet werden.

Durch die sphärische Aberration sehr stark gewölbter Linsen entstehen Brennlinien in ähnlicher Weise, wie wir sie bei den stark gekrümmten Hohlspiegeln in §. 133 kennen lernten.

Bestimmung der Vereinigungsweite nicht paralleler Strahlen. Ist einmal der Brennpunkt einer Linse bekannt, so kann man auch den Vereinigungspunkt solcher Strahlen bestimmen, welche von irgend einem leuchtenden Punkte ausgehen und auf die Linse fallen. Zunächst wollen wir nur leuchtende Punkte in Betracht ziehen, welche auf der Axe der Linse liegen. 138

Ein mit der Axe parallel auf die Linse fallendes Strahlenbündel kann man betrachten, als käme es von einem auf der Axe liegenden, aber unendlich weit entfernten leuchtenden Punkte. — Nehmen wir nun an, der leuchtende Punkt sei der Linse näher gerückt, er befinde sich in S, Fig. 292 (a. f. S.), so findet man den Vereinigungspunkt der von S aus auf die Linse fallenden Strahlen, wenn man den Punkt R ermittelt, in welchem ein Randstrahl SA nach seinem Durchgang durch die Linse die Axe schneidet.

Wie wir in §. 135 gesehen haben, ändert sich die durch ein Prisma hervorgebrachte Ablenkung nicht mit der Richtung der einfallenden Strahlen, wenn der brechende Winkel des Prismas klein genug ist. Dies findet nun auch seine Anwendung bei Linsen. Der Randstrahl SA wird ebenso stark durch die Brechung am Rande der Linse abgelenkt, wie der Strahl NA, welcher parallel mit der Axe einfällt. — NA wird aber nach dem Brennpunkte F gebrochen, der einfallende und austretende Strahl machen also einen Winkel NAF mit einander. Ebenso groß muß der Winkel SAR sein. Man findet also die Richtung des austretenden Strahles AR, wenn man über AF einen Winkel $RAF = x$ aufträgt, welcher ebenso groß ist als der Winkel $NAS = y$, um welchen der einfallende Strahl SA unter NA liegt.

Aus dieser Construction geht hervor, daß, wenn der leuchtende Punkt S der Linse auf der Axe näher rückt, der Vereinigungspunkt R sich von der Linse entfernen muß. Bei fortdauernder Annäherung des leuchtenden Punktes wird also auch einmal der Fall eintreten, wo der leuchtende Punkt S und der Vereinigungspunkt R gleichweit von der Linse abstehen, wie in Fig. 293. Für diesen Fall müssen der eintretende Strahl SA und der austretende AR gleiche Winkel mit der Axe machen, es muß also Winkel SRA gleich RSA sein. Da nun $RSA = y$ und $y = x$, so ist auch x gleich Winkel SRA, daher ist das Dreieck RAF ein gleichschenkliges und somit ist RF gleich FA; der Punkt R ist also um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt.

Wenn also der leuchtende Punkt um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt ist, so liegt der Vereinigungspunkt auf der anderen Seite in gleichem Abstande von der Linse.

Nähert sich der leuchtende Punkt der Linse noch mehr, so muß sich der Vereinigungspunkt noch weiter entfernen; wäre *R*, Fig. 292, ein leuchtender Punkt, so wäre *S* der entsprechende Vereinigungspunkt. Rückt der leuchtende Punkt in den Brennpunkt der Linse, so rückt der Vereinigungspunkt in unendliche Entfernung. Die von dem Brennpunkte *F'*, Fig. 290, auf die Linse fallenden Strahlen werden durch dieselbe in ein parallel mit der Axe austretendes Strahlenbündel verwandelt.

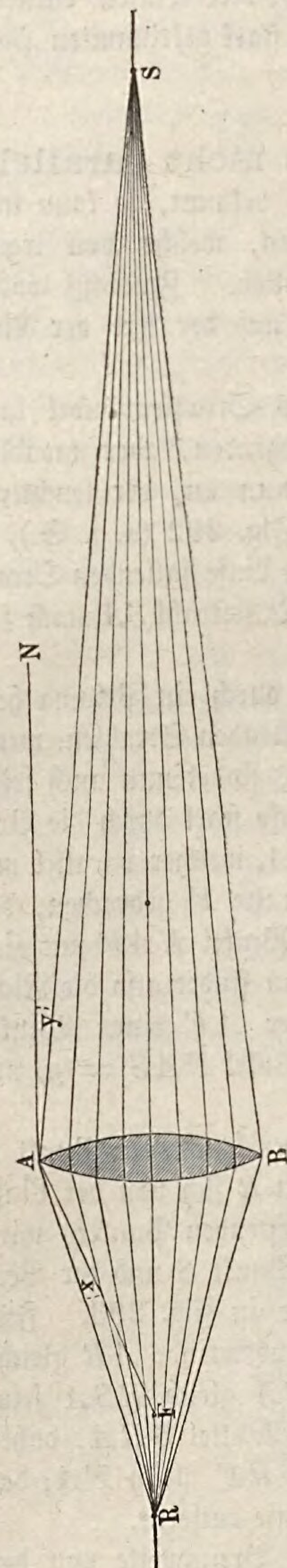


Fig. 292.

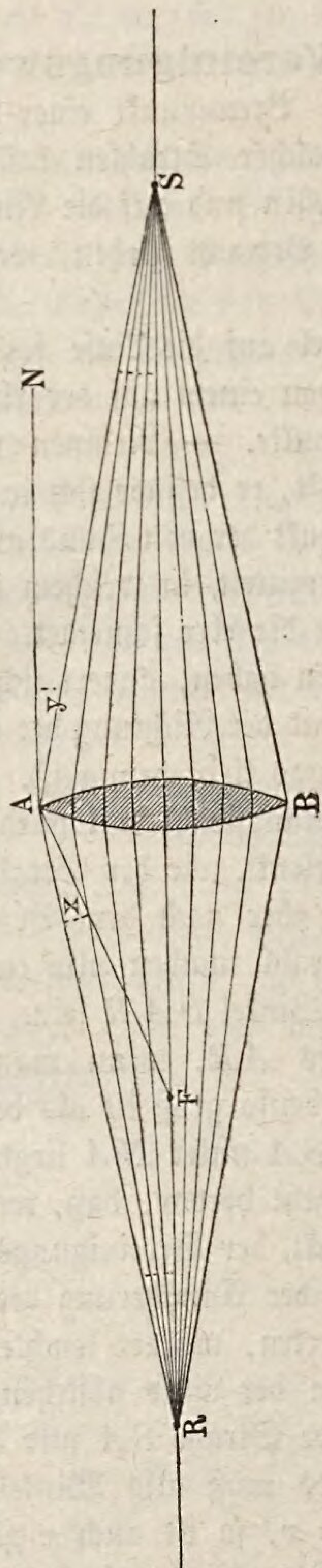


Fig. 293.

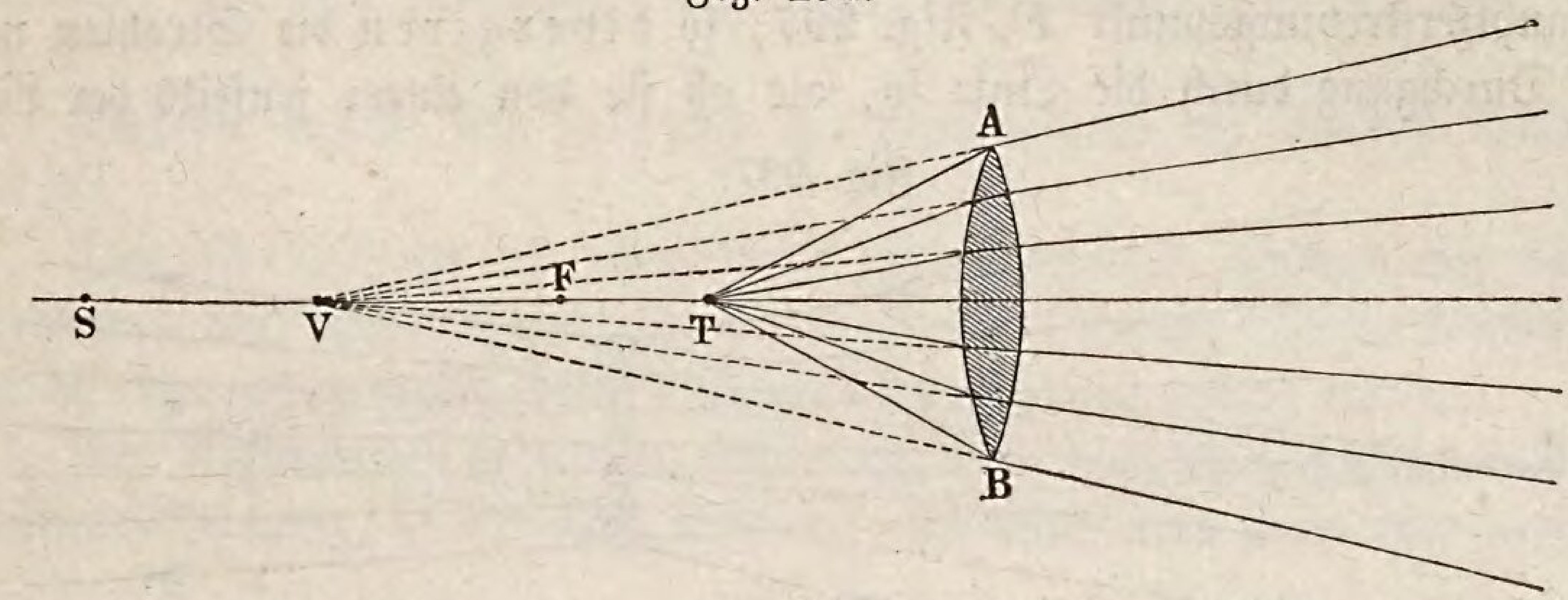
Wenn der leuchtende Punkt *T*, Fig. 294, der Linse so nahe rückt, daß er noch **innerhalb der Brennweite** fällt, so ist der Strahlenkegel, welcher auf die Linse trifft, so stark divergirend, daß die Linse die Strahlen nicht mehr convergent, oder auch nur parallel, sondern nur weniger divergent zu machen im Stande ist, so daß sie sich nach der Brechung in der Linse so verbreiten, als ob sie von einem Punkte *V* herkämen, welcher weiter von der Linse absteht, als der leuchtende Punkt.

Auch hier werden der Ort des leuchtenden Punktes und der seines Bildes als **conjugirte** Punkte bezeichnet. Die Lage der conjugirten Punkte ist mit der Brennweite auch hier wie bei den Kugelspiegeln durch die Gleichung

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f} \quad . \quad . \quad 1)$$

verknüpft, deren Ableitung man im Supplementbande findet und in welcher b die Entfernung des Bildes und g die Entfernung des Gegenstandes von der Linse, f aber deren Brennweite bezeichnet.

Fig. 294.



Concavlinsen. Aehnliche Betrachtungen lassen sich auch für Concavlinsen anstellen. Wenn die einfallenden Strahlen mit der Axe parallel sind, wie in Fig. 295, so divergiren die austretenden so, als ob sie von einem Punkte F herkämen, welcher der Hauptzerstreuungspunkt genannt wird. Rückt der leuchtende Punkt näher, ist er etwa in B, Fig. 296, sind also schon die auffallenden Strahlen divergirend, so divergiren sie nach dem Durchgange durch die Linse noch stärker, als es für die parallel eintretenden Strahlen der Fall war; 139

Fig. 295.

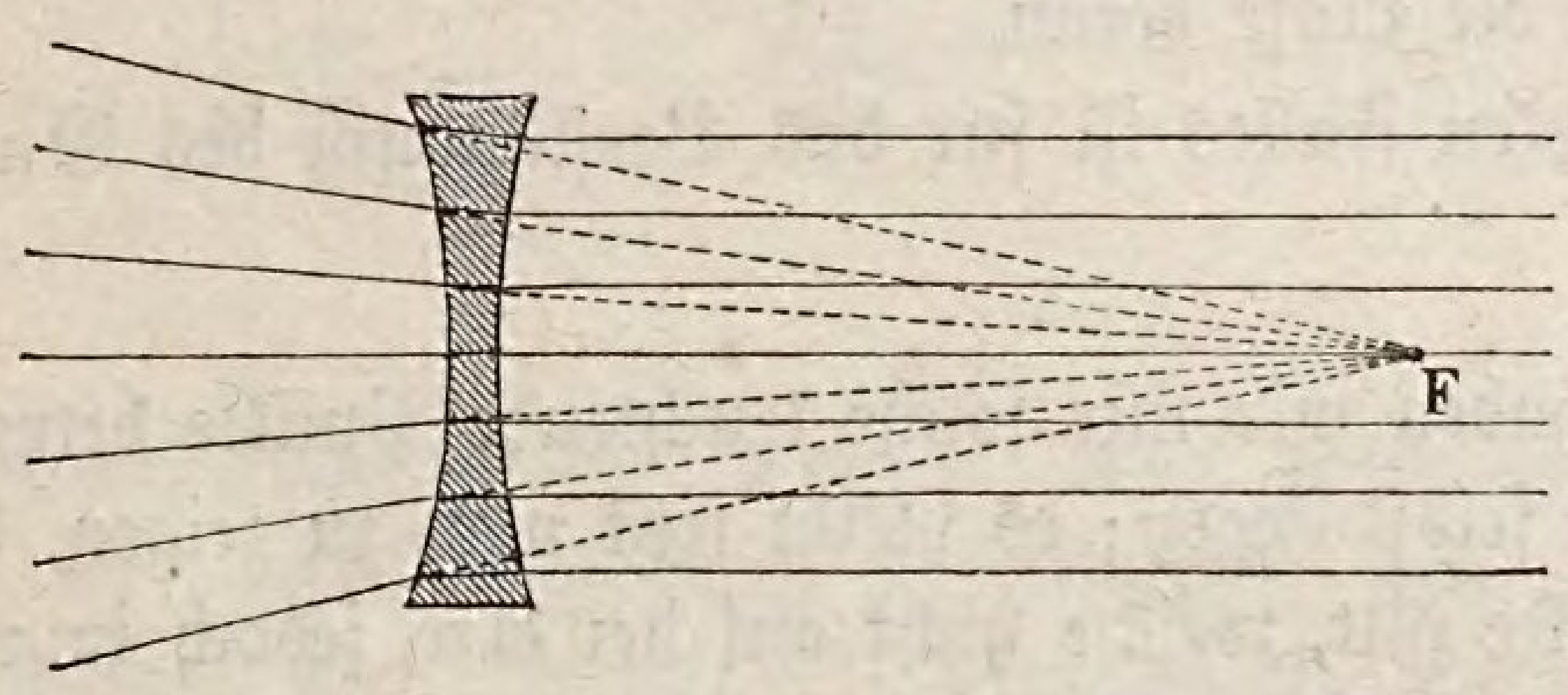
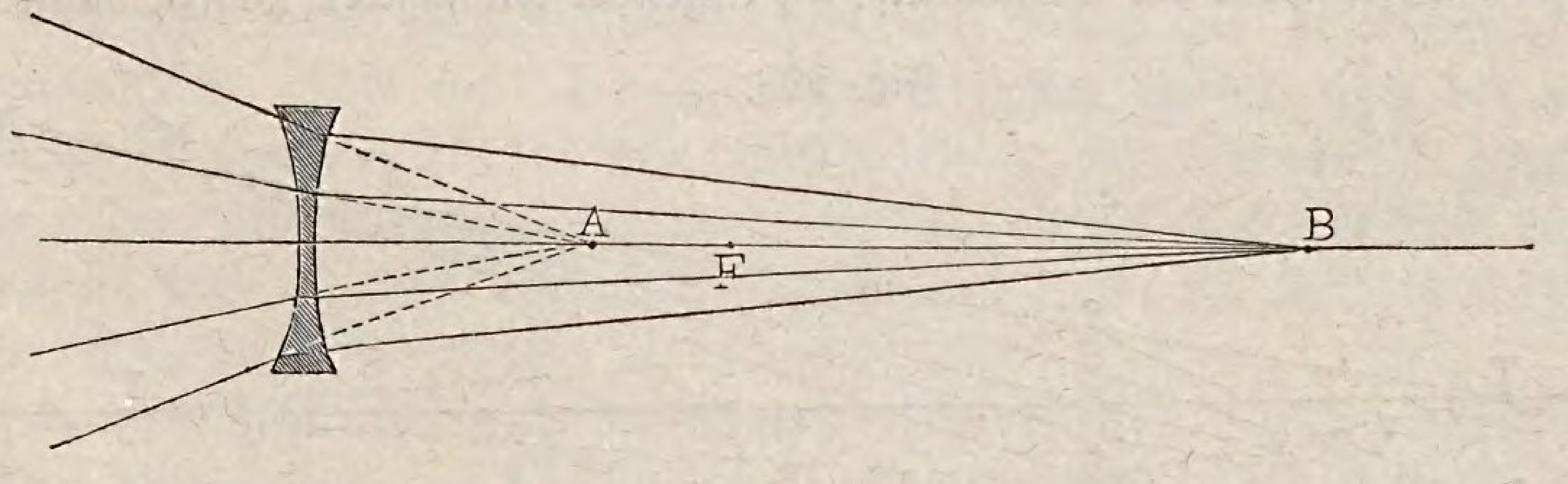


Fig. 296.



der Zerstreuungspunkt A rückt also der Linse um so näher, je näher der leuchtende Punkt kommt.

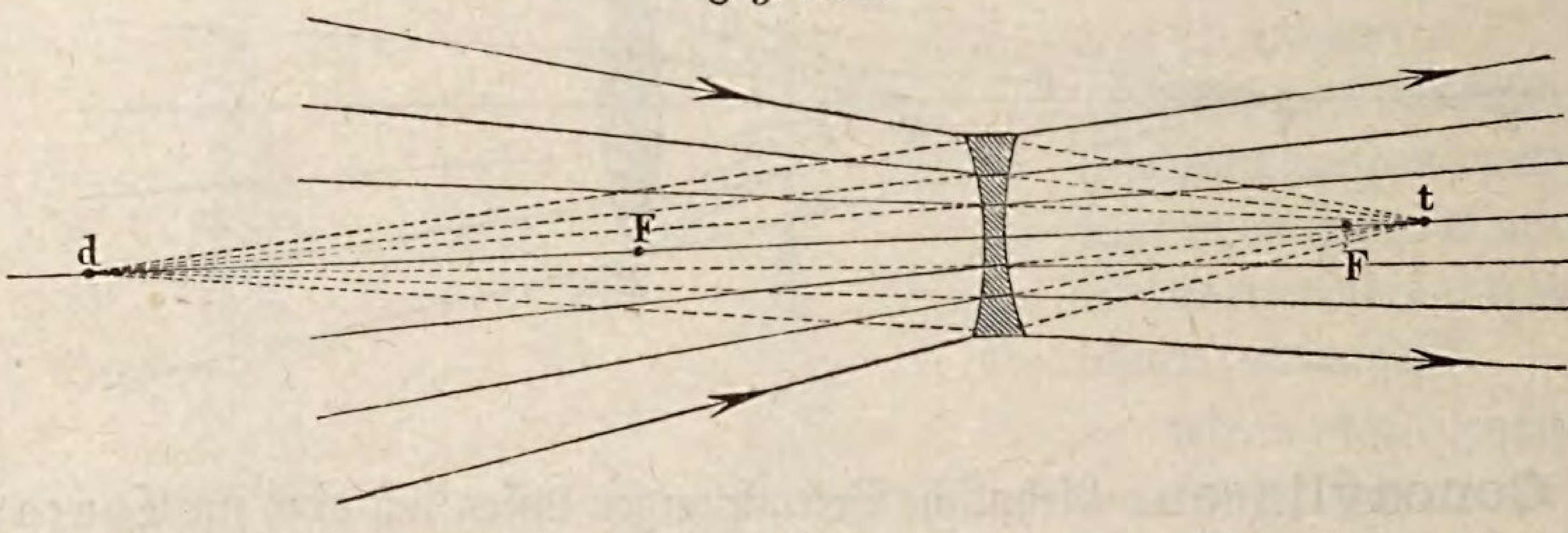
Wir wollen jetzt noch den Fall betrachten, daß die auffallenden Strahlen convergent sind. Man hat hier drei Unterfälle zu unterscheiden:

1. Wenn die einfallenden Strahlen gegen den Hauptzerstreuungspunkt F, Fig. 295, convergiren, so bilden die austretenden Strahlen ein mit der Axe der Linse paralleles Strahlenbündel.

2. Wenn der Convergenzpunkt A, Fig. 296, der Linse näher liegt, als der Hauptzerstreuungspunkt F, so convergiren die Strahlen nach ihrem Durchgang durch die Linse nach einem weiter von derselben abstehenden Punkte B.

3. Wenn der Convergenzpunkt t weiter von der Linse entfernt ist, als der Hauptzerstreuungspunkt F, Fig. 297, so divergiren die Strahlen nach ihrem Durchgang durch die Linse so, als ob sie von einem jenseits der Linse

Fig. 297.



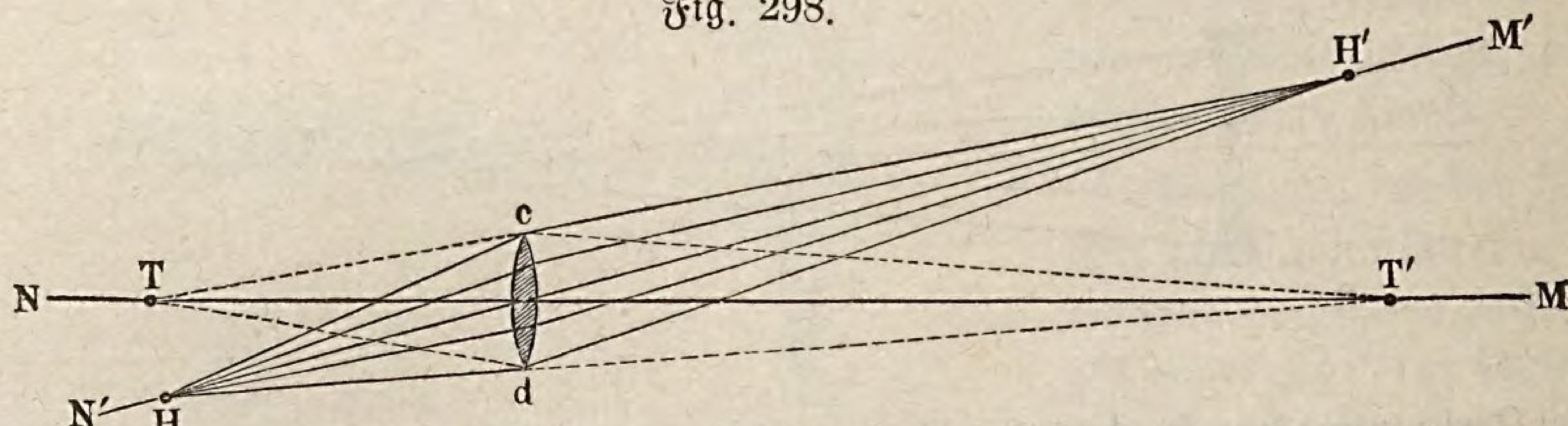
liegenden Punke d kämen, der aber jedenfalls weiter von der Linse absteht als der Hauptzerstreuungspunkt. Je mehr der Convergenzpunkt t von der Linse wegrückt, desto näher rückt d an die Linse heran.

Die Betrachtung dieses letzten Falles ist für das Verständniß des Galiläi'schen Fernrohrs wichtig.

140 **Nebenaxen.** Bisher haben wir nur solche leuchtende Punkte betrachtet, welche auf der Axe der Linse selbst liegen; es bleibt jetzt noch zu zeigen, daß das Gesagte auch für solche Punkte gilt, welche nicht auf der Axe, jedoch immerhin so liegen, daß die Geraden, welche man von diesen Punkten durch die Mitte der Linse gezogen denkt und die man Nebenaxen nennt, nur kleine Winkel mit der Axe bilden.

In Fig. 298 sei H ein nicht auf der Axe zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite der Convexlinse cd liegender leuchtender Punkt, dann wer-

Fig. 298.



den alle von ihm ausgehenden Lichtstrahlen in einem Punkte H' vereinigt werden, welcher auf der Nebenaxe $N'M'$ eben so weit von der Linse absteht, wie der Vereinigungspunkt T' der Strahlen, die von einem auf der Axe liegenden Punkte T ausgehen, welcher eben so weit von der Linse entfernt ist wie H.

Es ist dies leicht zu beweisen. Der mittlere Strahl HM' geht ungebrochen durch die Linse hindurch; ferner ist, wenigstens sehr nahe, $Hc = Tc$

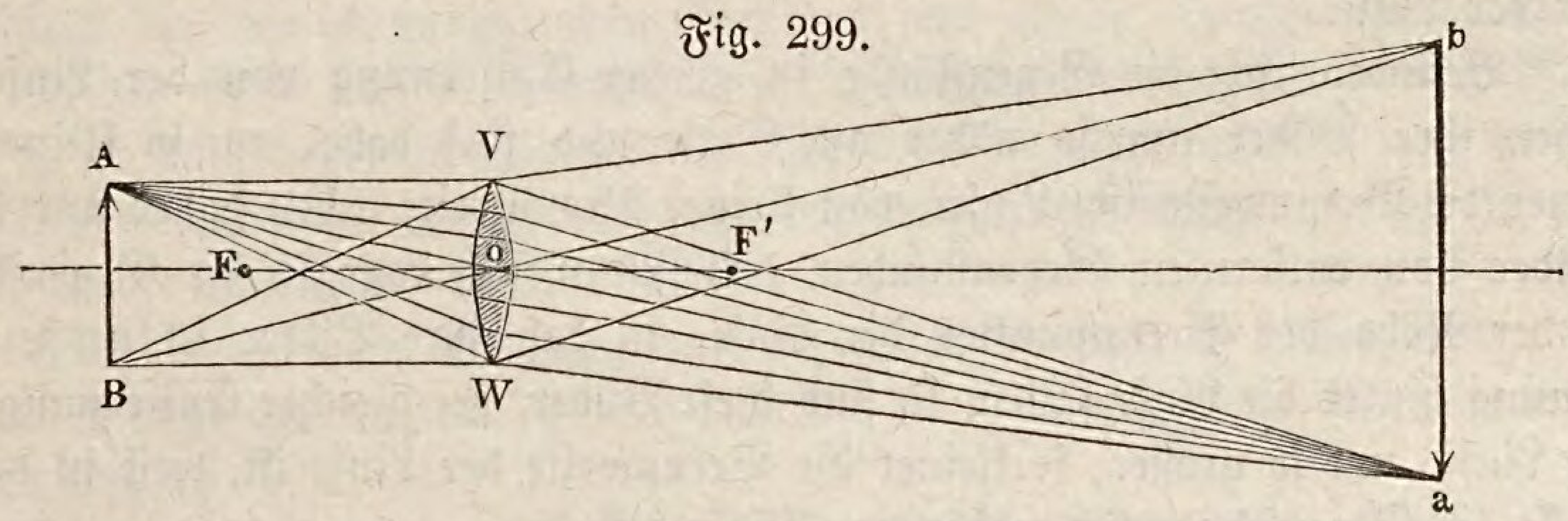
und Winkel $cTM = cHM'$. Da der Strahl Tc in c ebenso stark abgelenkt wird wie Hc, so ist noch Winkel $HcH' = TcT'$, folglich ist das Dreieck HcH' congruent mit dem Dreieck TcT', somit auch $TT' = HH'$. Der Punkt H' ist also, wenigstens sehr nahe, eben so weit von der Linse entfernt wie T'.

Dasselbe ergiebt sich auch aus der Vergleichung der Dreiecke TdT' und HdH'.

Das Gesichtsfeld einer Linse ist der Winkel, welchen die äußersten Nebenaxen auf beiden Seiten der Axe noch mit einander machen können, ohne daß die Voraussetzungen unseres Beweises merklich unrichtig werden.

Der Abstand des Bildes a, Fig. 299, kann nach der auf Seite 274 angegebenen Gleichung 1) berechnet werden; man kann aber seine Lage auch durch

Fig. 299.



folgende Construction finden. Man ziehe zunächst durch den Gegenstand A den Nebenaxenstrahl Aa, derselbe geht ungebrochen durch die Linse; alsdann ziehe man den Strahl AV parallel mit der Axe, derselbe geht nach der Brechung durch den Hauptbrennpunkt F' und schneidet hierauf den Nebenaxenstrahl im Punkte a, welcher das Bild von A ist.

Linsenbilder. In Fig. 299 sei AB ein Gegenstand, der sich auf 141
der einen Seite einer Sammellinse befindet, aber weiter von ihr absteht als der Brennpunkt F. Die von A ausgehenden Strahlen werden nach der soeben angegebenen Construction in dem Bildpunkte a auf der von A durch die Mitte o der Linse gezogenen Nebenaxe vereinigt; ebenso ist b das Bild von B mithin ist auch ab das Bild des Gegenstandes AB; das Bild ist in diesem Falle umgekehrt und reell.

Von der Mitte der Linse aus gesehen erscheinen Bild und Gegenstand unter gleichem Winkel, denn der Winkel boa ist dem Winkel BoA als seinem Scheitelwinkel gleich. Ob nun das Bild oder der Gegenstand größer ist, hängt demnach davon ab, ob Bild oder Gegenstand weiter von der Linse entfernt ist. Nehmen wir an, der Gegenstand liege um die doppelte Brennweite von dem Glase entfernt, so wird das Bild auf der anderen Seite in gleicher Entfernung entstehen; in diesem Falle sind also Bild und Gegenstand gleich groß. Rückt der Gegenstand der Linse näher, so entfernt sich das Bild, es wird also größer. Von solchen Gegenständen also, die um mehr als die einfache Brennweite, aber weniger als die doppelte Brennweite von der Linse abstehen, erhält man umge-

kehrte vergrößerte Bilder; so ist in unserer Figur das Bild *ab* größer als der Gegenstand *AB*.

Wenn der Gegenstand weiter von der Linse entfernt ist als die doppelte Brennweite, so liegt das Bild ihr näher; von entfernten Gegenständen erhält man also umgekehrte verkleinerte Bilder. Wäre *ab*, Fig. 299, ein solcher Gegenstand, der um mehr als die doppelte Brennweite vom Glase absteht, so würde man das verkleinerte Bild *AB* erhalten.

Nennen wir *m* die Größe des Gegenstandes, *n* die des Bildes, *g* die Entfernung des Gegenstandes und *b* die Entfernung des Bildes vom Glase, so ist

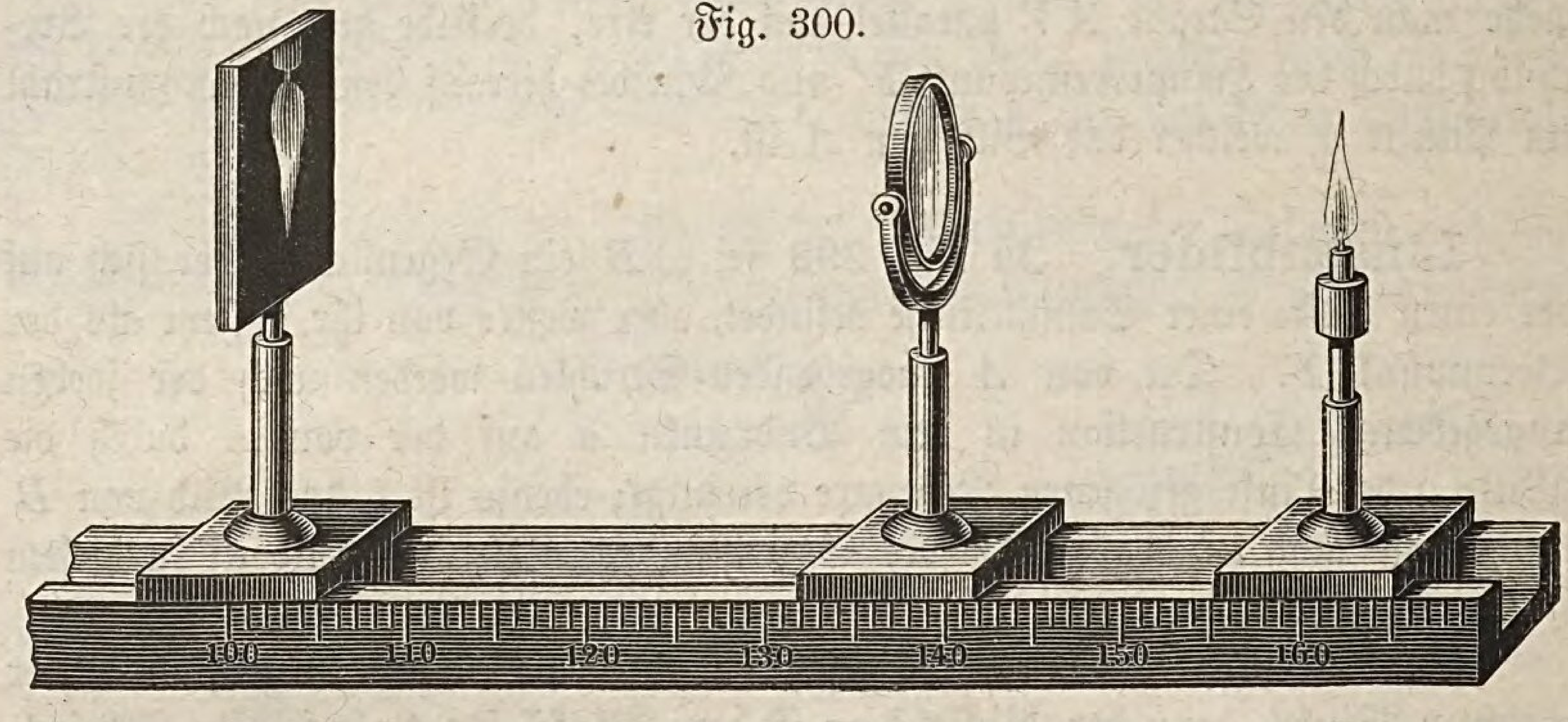
$$m : n = g : b$$

d. h. die Größen von Bild und Gegenstand verhalten sich wie ihre Entfernungen von der Linse.

Befinden sich die Gegenstände in großer Entfernung von der Linse, so liegen ihre Bilder um so näher am Glase und sind daher um so kleiner, je kürzer die Brennweite ist; Linsen von kleiner Brennweite geben daher nur kleine Bilder von entfernten Gegenständen. Befinden sich dagegen die Gegenstände in der Nähe des Brennpunktes der Linse, so daß ihre Bilder in große Entfernung hinter die Linse fallen, so sind diese Bilder, bei gleicher Entfernung von der Linse, um so größer, je kleiner die Brennweite der Linse ist, weil in diesem Falle die Gegenstände sich näher am Glase befinden.

Fig. 300 zeigt, wie man die eben besprochenen Gesetze der durch Linsengläser erzeugten reellen Bilder durch den Versuch bestätigen kann.

Fig. 300.

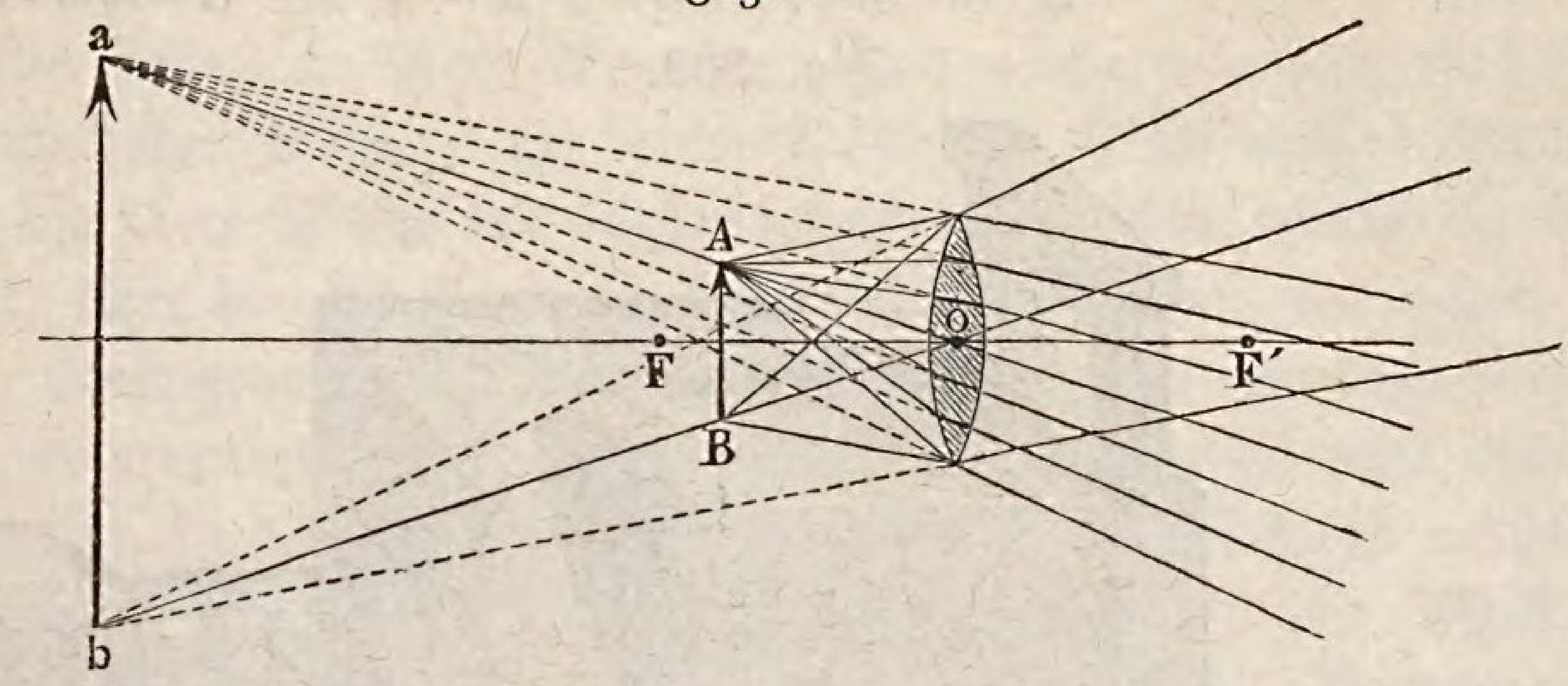


Von den reellen Bildern, welche durch Convexlinsen erzeugt werden, wird in der Camera obscura, der Laterna magica und dem Sonnenmikroskop Anwendung gemacht, und zwar sind es bei der Camera obscura die verkleinerten Bilder entfernterer Gegenstände, bei den beiden zuletzt genannten Apparaten die vergrößerten Bilder kleiner Gegenstände, welche dem Brennpunkt der Linse nahe stehen.

Wenn der Gegenstand sich innerhalb der Brennweite der Linse befindet, so kann kein reelles Bild von ihm entstehen, weil die Strahlen, welche

von einem Punkte ausgehen, der der Linse näher liegt als der Brennpunkt, nach ihrem Durchgange durch die Linse immer noch divergiren. In Fig. 301

Fig. 301.

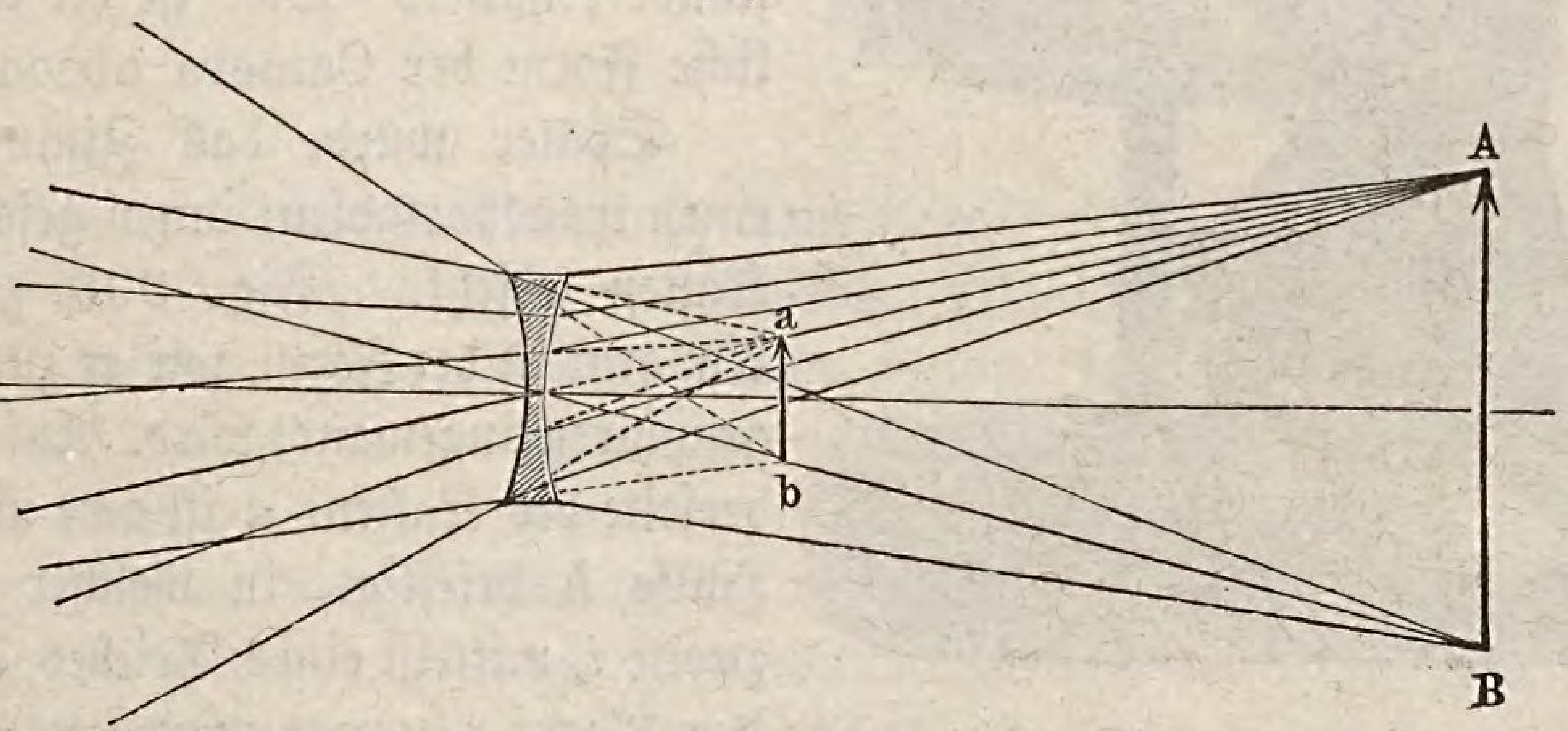


sei *AB* ein solcher innerhalb der Brennweite befindlicher Gegenstand; dann divergiren die von *A* ausgehenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse so, als ob sie von *a* kämen. Die Entfernung des Punktes *a* vom Glase kann man nach der oben angegebenen Construction leicht finden. Die von *B* ausgehenden Strahlen divergiren nach dem Durchgange durch die Linse so, als ob sie von *b* kämen; *ab* ist also das Bild eines innerhalb der Brennweite befindlichen Gegenstandes *AB*, und zwar ist dieses Bild aufrecht, vergrößert und virtuell, da es nicht auf einem Schirm aufgefangen werden kann.

Von der Anwendung, welche man von Convexlinsen macht, um durch sie kleine innerhalb der Brennweite befindliche Gegenstände vergrößert zu sehen, wird später noch die Rede sein. Eine zu diesem Zwecke verwendete Convexlinse wird eine Loupe genannt.

Die Concavlinsen geben keine reellen, sondern nur virtuelle Bilder. Da nun eine solche Linse die Strahlen, welche von einem Punkte ausgehen, noch divergenter macht, so daß sie von einem näher am Glase liegenden Punkte

Fig. 302.



herzukommen scheinen, so ist klar, daß durch Concavlinsen nur verkleinerte Bilder der Gegenstände hervorgebracht werden, wie man leicht aus Fig. 302 ersehen wird, wo *AB* der Gegenstand und *ab* das Bild ist.

Die Camera obscura. Die von dem Neapolitaner Porta um die Mitte des siebzehnten Jahrhunderts erfundene Camera obscura besteht im 142

Wesentlichen aus einer Convexlinse von etwas großer Brennweite, durch welche ein Bild entfernter Gegenstände, etwa einer Landschaft, entworfen wird. Um den Effect dieses Bildes möglichst zu heben, muß von der Fläche, auf welcher

Fig. 303.

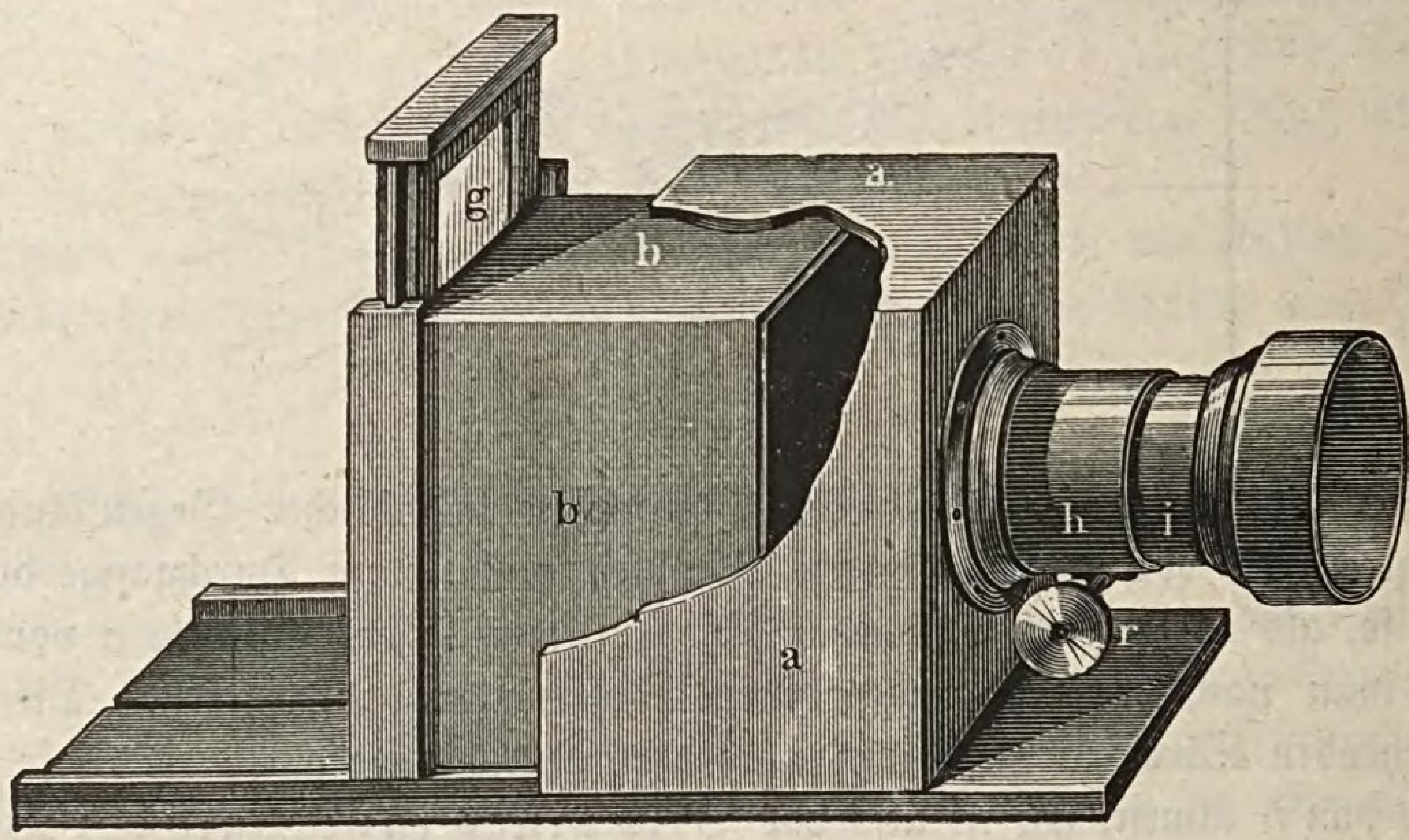
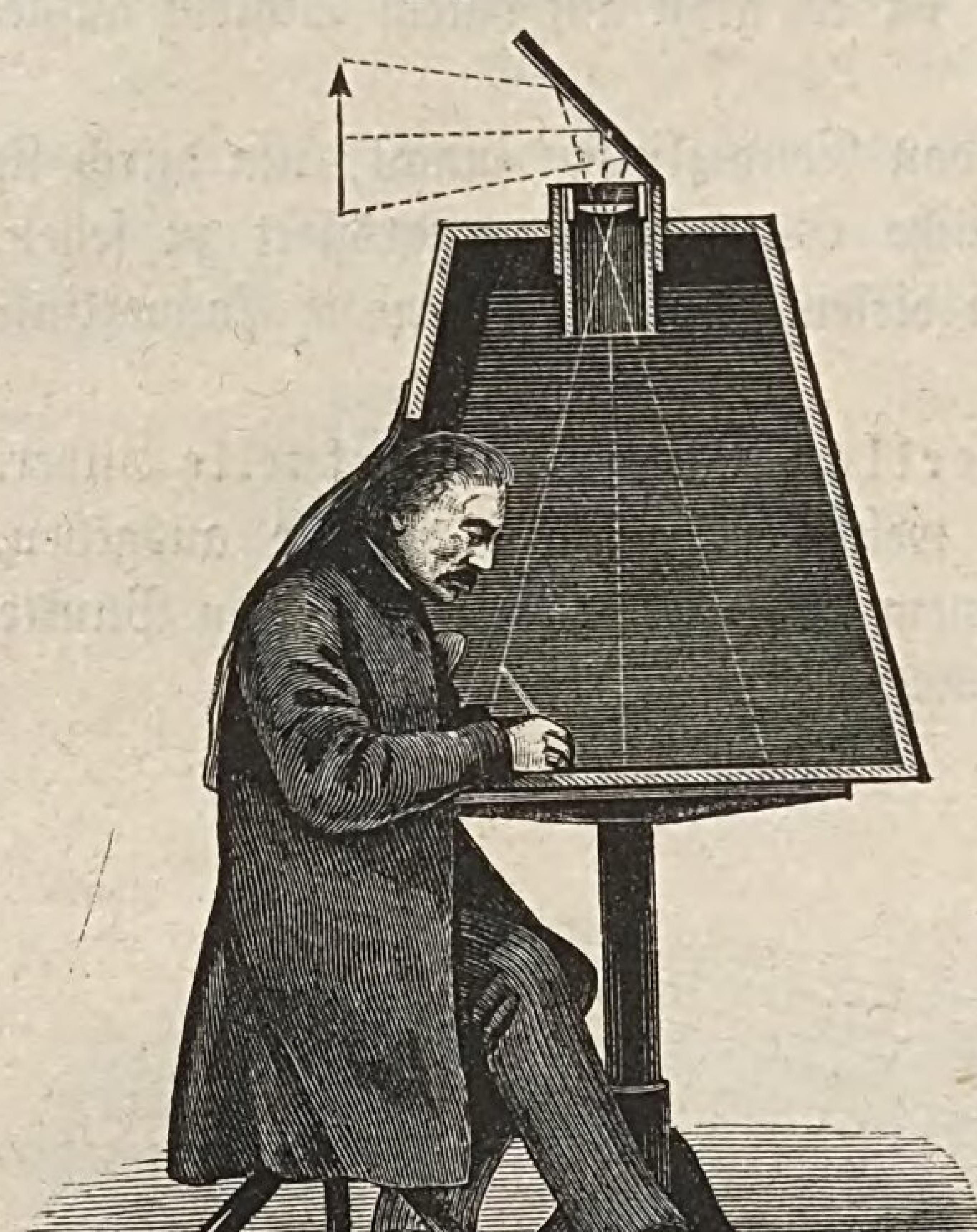


Fig. 304.



es aufgefangen wird, alles seitliche, nicht dazugehörige Licht sorgfältig ausgeschlossen werden, d. h. es muß in einer dunklen Kammer aufgefangen werden.

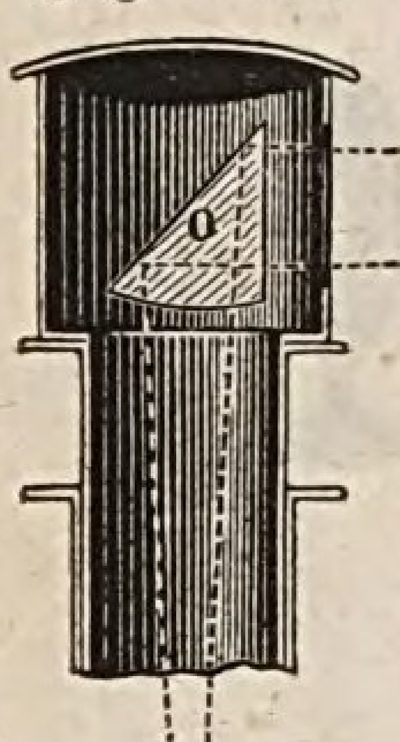
Setzt man die Linse in den Laden eines dunklen Zimmers, so wird man auf einem der Linse in gehöriger Entfernung gegenüberstehenden Schirme das Bild der außerhalb befindlichen Gegenstände erhalten. Dies ist die ursprüngliche Form der Camera obscura.

Später wurde das Zimmer durch einen transportablen, innen geschwärzten Kasten ersetzt. Fig. 303 zeigt den Apparat in der Form, wie er zum Photographiren angewandt wird. Auf der Vorderseite des Kastens *a* ist eine messingene Hülse *h* befestigt, in welcher sich eine zweite *i*, mittelst eines Triebes, der durch den Knopf *r* bewegt wird, aus- und einschieben läßt. Die Hülse *i* enthält die Linse, welche ihre Bilder auf einer ihr gegenüberstehenden mattgeschliffenen Glastafel *g* entwirft. Diese Glastafel ist in einem Schieber befestigt, welcher die Rückwand des in den Kasten *a* hineinpassenden, nach vorn hin offenen Kastens *b* bildet. Unsere Figur zeigt den Schieber mit der Glastafel etwas in die Höhe gezogen. Je näher der Gegen-

stand rückt, dessen Bild man erhalten will, desto weiter muß man den Kasten *b* aus *a* herausziehen. Die feinere Einstellung geschieht durch Verschiebung der Linse mittelst des schon erwähnten Triebes *r*.

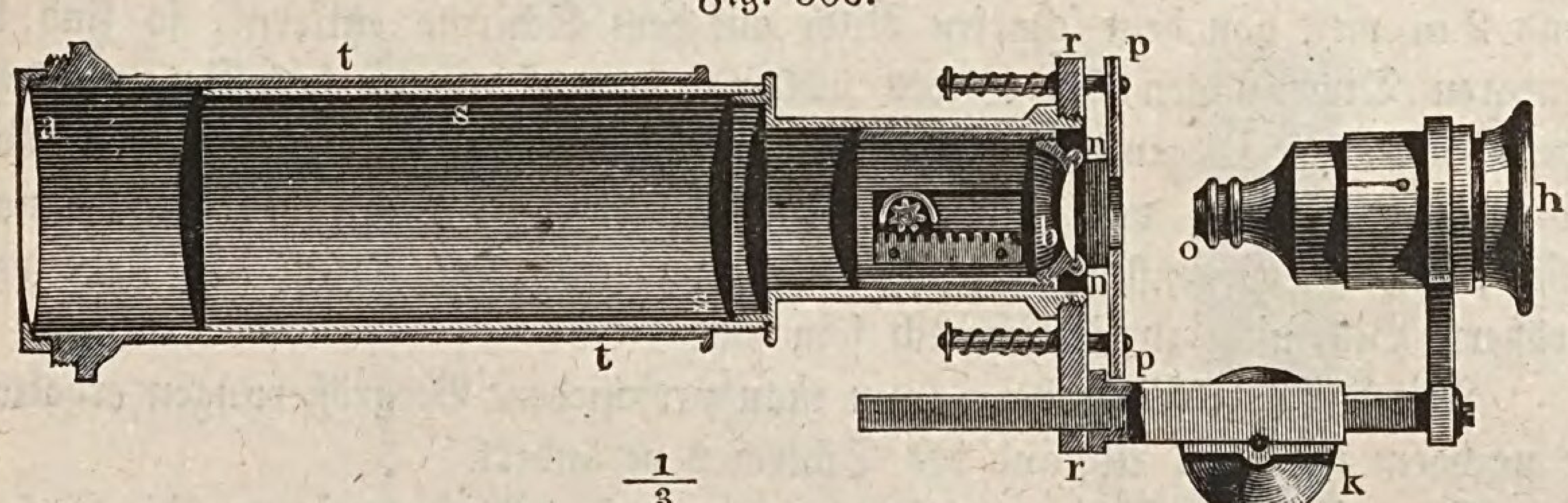
Fig. 304 stellt eine ältere Form der Camera obscura dar; sie besteht aus einem ziemlich hohen Kasten, auf dessen Boden ein Blatt weißes Papier gelegt wird; durch die obere Fläche des Kastens geht eine Röhre, welche die Sammellinse enthält, über der sich dann ein in einem Winkel von 45° gegen die Verticale geneigter ebener Spiegel befindet. Die von dem Gegenstande kommenden Strahlen werden durch den Spiegel nach unten reflectirt, so daß das Bild auf der Fläche des Papiers entsteht; man kann also die Contouren dieses Bildes leicht mit Bleistift nachzeichnen. Die Contouren werden jedoch bei Anwendung eines Spiegels undeutlich, da derselbe das Licht nicht nur auf der Rückfläche, sondern auch auf der Vorderfläche reflectirt und so zwei Bilder liefert, welche nicht genau aufeinander fallen. Es ist daher zweckmäßiger statt des Spiegels und der Linse ein Reflexionsprisma (Fig. 305) anzuwenden, dessen eine Kathetenfläche sphärisch geschliffen ist und somit wie eine Sammellinse wirkt.

Fig. 305.



Das Sonnenmikroskop und die Laterna magica. Fig. 306 stellt ein Sonnenmikroskop zum Theil im Durchschnitt dar. Die Messingröhre 143

Fig. 306.

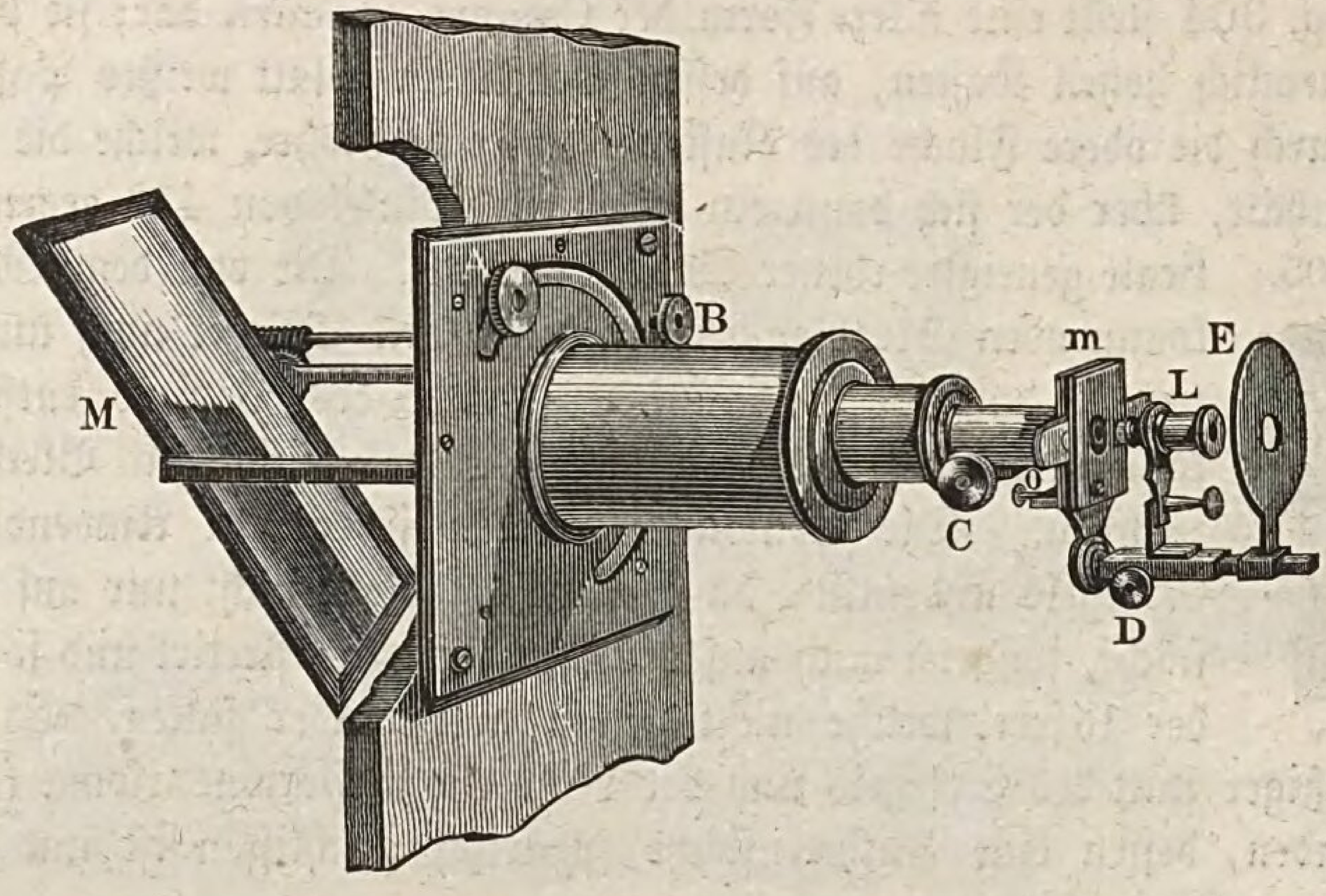


t wird in die entsprechende Oeffnung eines Ladens eingeschraubt, durch dessen Schließung das Experimentirzimmer vollständig verfinstert worden ist. Vor der fraglichen Oeffnung befindet sich ein Spiegel, welcher stets so zu richten ist, daß er die Sonnenstrahlen in der Richtung der Axe des Rohres *t* auf die Linse *a* wirft. Die durch die Linse *a* bereits convergent gemachten Strahlen fallen auf eine zweite Linse *b*, durch welche sie auf den kleinen, gewöhnlich zwischen zwei Glasplatten bei *n* gefaßten Gegenstand concentrirt werden. Von diesem stark erleuchteten Gegenstande wird nun durch eine kleine Linse *o*, welche an der bei *h* offenen Messinghülse angeschraubt ist, auf einem im dunklen Zimmer aufgestellten Schirme ein verkehrtes vergrößertes Bild entworfen.

Mit Hülfe des Triebes *k* kann man den Abstand der Linse *o* von dem Objecte *n* so reguliren, daß auf dem 3 bis 5 m entfernten Schirm ein scharfes Bild entsteht.

Fig. 307 stellt die Totalansicht eines Sonnenmikroskopes dar. Die Neigung des die Sonnenstrahlen reflectirenden Spiegels *M* gegen die Axe des

Fig. 307.



Rohres kann durch die Drehung des Knopfes *B* mittelst einer Schraube ohne Ende regulirt werden, während die Drehung des Spiegels um die Axe des Rohres durch die Drehung des Knopfes *A* bewerkstelligt wird.

Nehmen wir an, die Linse *o*, Fig. 306, sei gerade 1 cm weit vom Objecte und 2 m weit von dem scharfen Bilde auf dem Schirme entfernt, so sind die linearen Dimensionen des Bildes 200 mal so groß als die des Gegenstandes; wenn daher der Gegenstand eine Fläche von 1 qmm bedeckt, so wird sein Bild einen Flächenraum von 40 000 qmm einnehmen. Man begreift demnach leicht, daß der Gegenstand sehr hell erleuchtet sein muß, wenn das stark vergrößerte Bild nicht zu lichtschwach sein soll.

Mit derselben Linse bei *o* kann man verschiedene Vergrößerungen erhalten, je nachdem man den Abstand des Schirmes verändert.

Je weiter der Schirm entfernt wird, desto näher muß man die Linse *o* dem Objecte bringen, und desto stärker wird die Vergrößerung.

Um bei gleichem Abstande des Schirmes stärkere Vergrößerungen zu erhalten, wird eine Combination von zwei oder von drei Linsen bei *o* angeschraubt.

Man hat auch ähnliche Mikroskope construirt, in denen das Licht der Sonne durch künstliches Licht, etwa durch das Licht eines im Knallgasgebläse glühend gemachten Kalkstückchens (Drummond'sches Kalklicht), oder durch elektrisches Licht, oder endlich auch nur durch eine intensiv leuchtende Lampe ersetzt sind. Je schwächer die Lichtquelle ist, desto geringere Vergrößerung kann man anwenden.

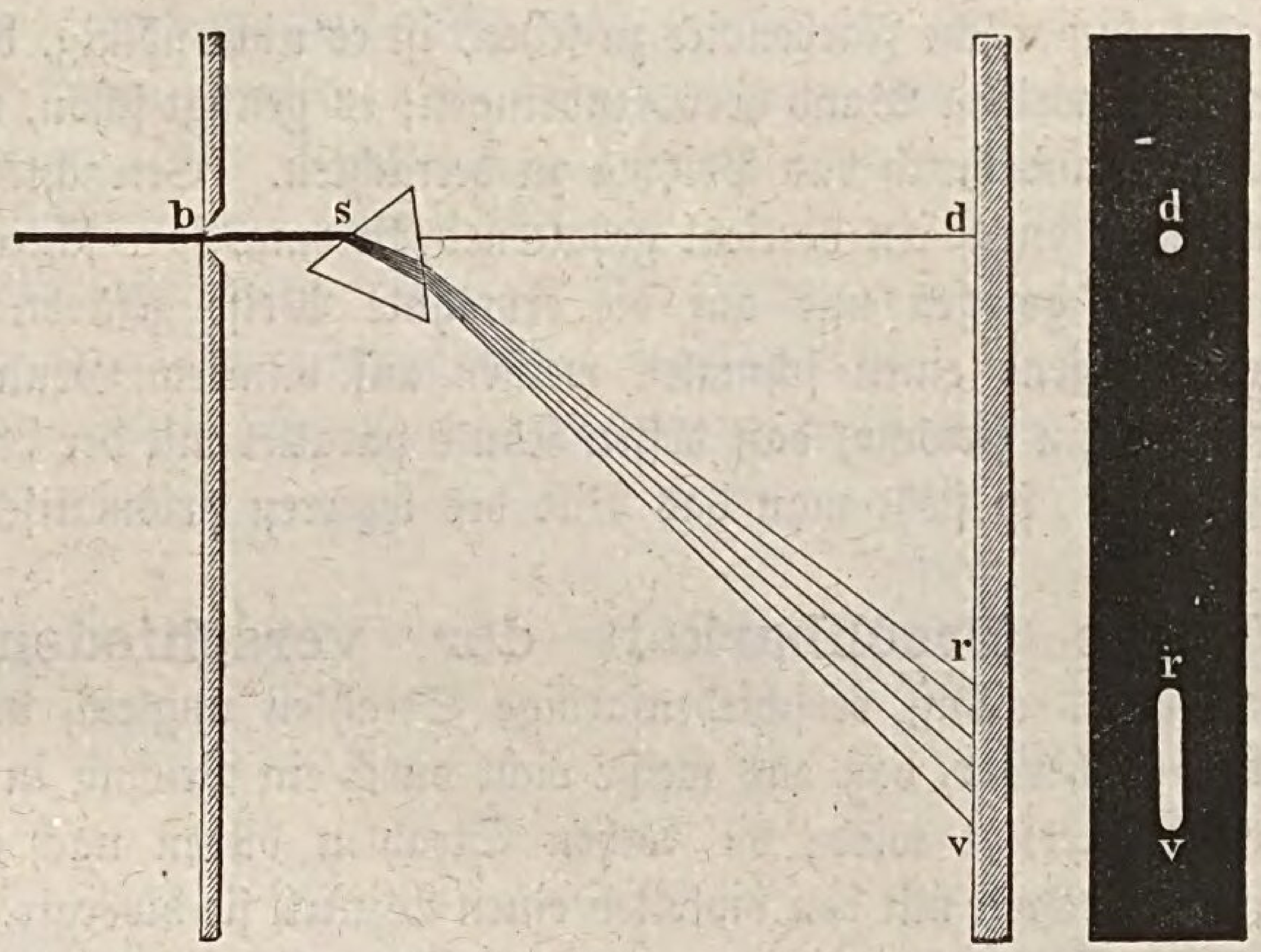
Die Zauberlaterne (laterna magica) beruht auf denselben Principien, nur sind die Gegenstände in größeren Dimensionen auf Glas gemalt und werden durch das Licht einer Lampe erleuchtet, die höchstens eine 15- bis 20fache Vergrößerung erlaubt.

Viertes Capitel.

Die Farbenlehre.

Zerlegung des weissen Lichtes. Wenn durch eine kleine runde Oeffnung im Laden eines dunklen Zimmers ein Bündel Sonnenstrahlen *bd*, Fig. 308, in ein finsteres Zimmer eintritt, so entsteht auf der gegen- 144

Fig. 308. Fig. 309.



überstehenden Wand bei *d* ein runder weißer Fleck, welcher ein Sonnenbild ist. Fängt man aber das Strahlenbündel durch ein Prisma *s* auf, so erhält man, wie schon auf Seite 267 bemerkt wurde, das in die Länge gezogene gefärbte Bild *rv*. Wenn die brechende Kante des Prismas vertical steht, so bildet *rv* einen horizontalen Farbenstreifen.

Dieses farbige in die Länge gezogene Sonnenbild wird das Spectrum genannt.

Die Länge des Spectrums ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je größer der brechende Winkel des Prismas ist. Auch von der Substanz, aus welcher das Prisma besteht, hängt die Länge des Spectrums ab.

Der oberste Farbenstreifen 1. der hinten angehängten Tafel stellt ein vollständiges Spectrum dar. Man unterscheidet in demselben sieben Hauptfarben in folgender Ordnung: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett.

Diese Farben werden Regenbogenfarben, prismatische Farben oder auch einfache Farben genannt. Streng genommen, giebt es unzählig viele verschiedene Farben im Spectrum, da die Farben allmälig in einander übergehen; das Auge unterscheidet aber nur sieben Hauptnüancen.

Das rothe Ende des Spectrums ist jederzeit der Stelle zugekehrt, an welcher das runde weiße Sonnenbild *d*, Fig. 309 (a. v. S.), erscheinen würde, wenn das Prisma nicht dagewesen wäre; die rothen Strahlen haben also die geringste Ablenkung erfahren.

Um ein recht schönes Farbenspectrum zu erhalten, wendet man ein Flintglasprisma, oder ein mit Schwefelkohlenstoff gefülltes Hohlprisma an, dessen brechender Winkel 60° beträgt; statt durch eine kleine runde Oeffnung läßt man aber die Sonnenstrahlen durch einen 1 bis 2 mm breiten, 3 bis 4 cm hohen Spalt einfallen, welcher der brechenden Kante des Prismas parallel steht, und fängt das Spectrum auf einem weißen Papierschirm auf, welcher 2 bis 3 m vom Prisma entfernt ist.

Um das prismatische Farbenbild zu sehen, ist es nicht nöthig, das Sonnenspectrum auf einer weißen Wand hervorzubringen; es genügt schon, einen schmalen hellen Gegenstand durch das Prisma zu betrachten. Betrachtet man z. B. eine Kerzenflamme durch ein vertical gehaltenes Prisma, so erscheint sie bedeutend in die Breite gezogen und auf die erwähnte Weise gefärbt. Betrachtet man überhaupt irgend einen schmalen weißen auf dunklem Grunde liegenden Streifen so durch ein Prisma, daß dessen Kante parallel mit der Längsrichtung dieses Streifens ist, so sieht man das Bild des letzteren prismatisch gefärbt.

145 **Ungleiche Brechbarkeit der verschiedenfarbigen Lichtstrahlen.** Daß verschiedenfarbige Strahlen ungleich brechbar sind, geht schon daraus hervor, daß das weiße Licht durch ein Prisma in verschiedenfarbige Strahlen zerlegt wird; die rothen Strahlen bilden nach dem Durchgange durch das Prisma mit den violetten einen Winkel, sie divergiren, und zwar sind die violetten Strahlen mehr von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt als die rothen. Die violetten Strahlen sind unter allen Lichtstrahlen am stärksten brechbar, die rothen sind es am wenigsten. Die grünen Strahlen sind stärker brechbar als die rothen und weniger als die violetten, weil im Spectrum das Grün zwischen Roth und Violett liegt.

Jede Farbe ist einfach oder homogen, wenn sie nicht aus Strahlen von verschiedener Brechbarkeit besteht und also durch das Prisma nicht in verschiedenfarbige Strahlen zerlegt werden kann.

Wenn man ein Spectrum auf einem Schirm auffängt, welcher an einer bestimmten Stelle desselben, etwa da, wo die blauen Strahlen auffallen, einen Spalt hat, Fig. 310, so werden alle Farben aufgefangen bis auf ein schmales Strahlenbündel, welches durch den Spalt hindurchgeht. Dieses Strahlenbündel nun läßt sich, wie Newton zuerst gezeigt hat, auf keinerlei Weise weiter zerlegen; denn wenn man es auch durch ein zweites Prisma *p* gehen läßt, so bleibt seine Farbe doch unverändert; wir haben es hier also mit homogenem Lichte zu thun.

Fig. 310.

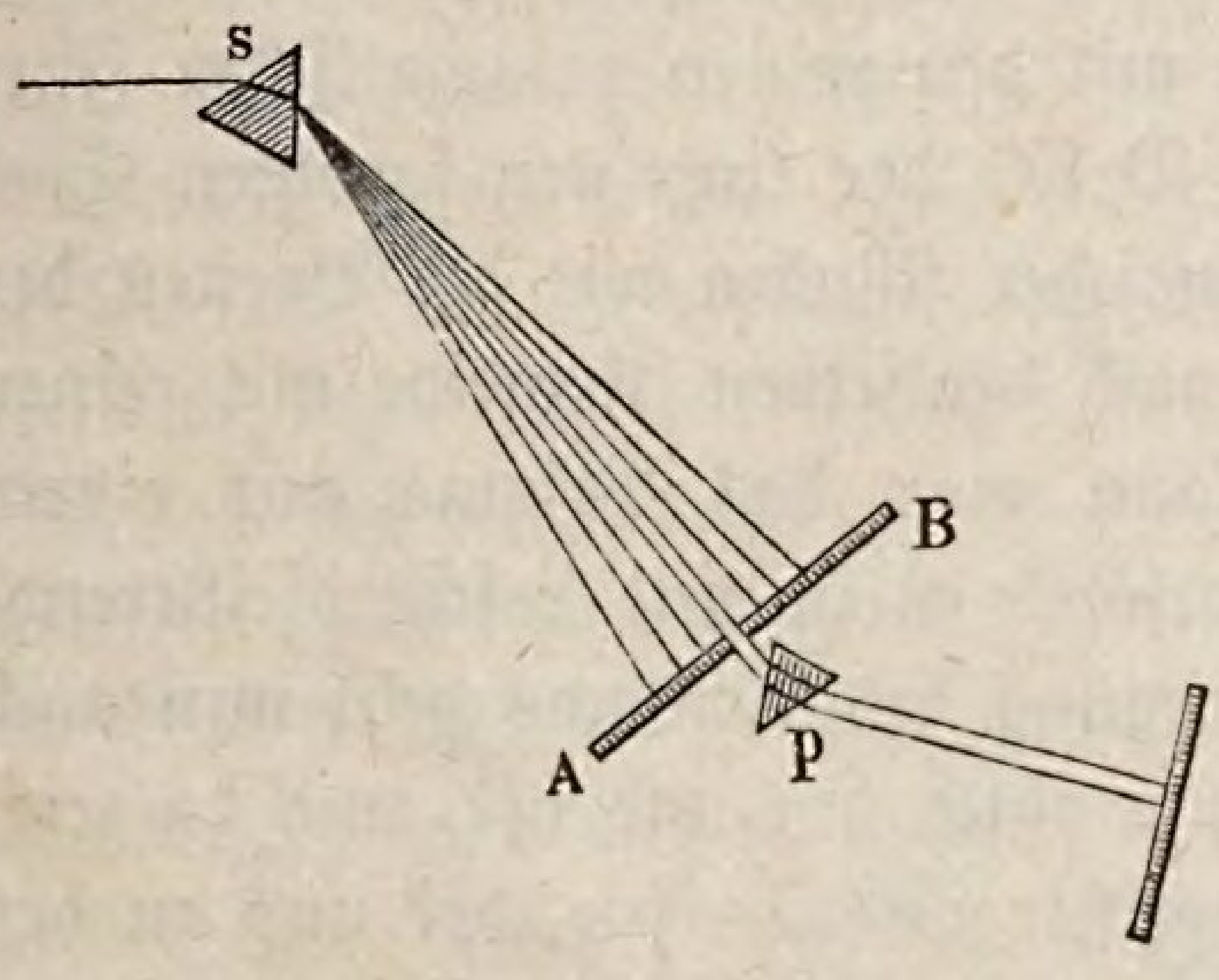
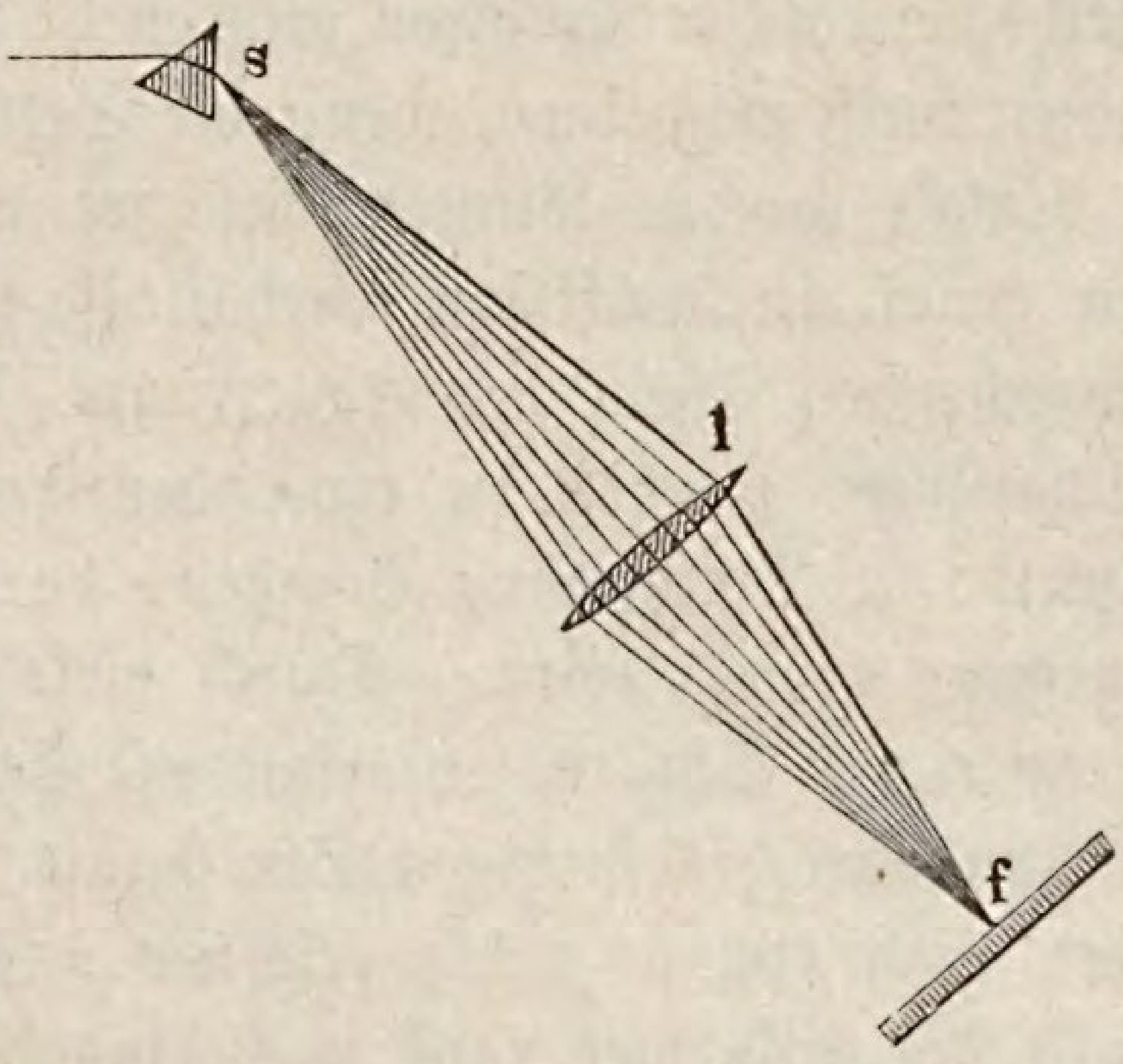


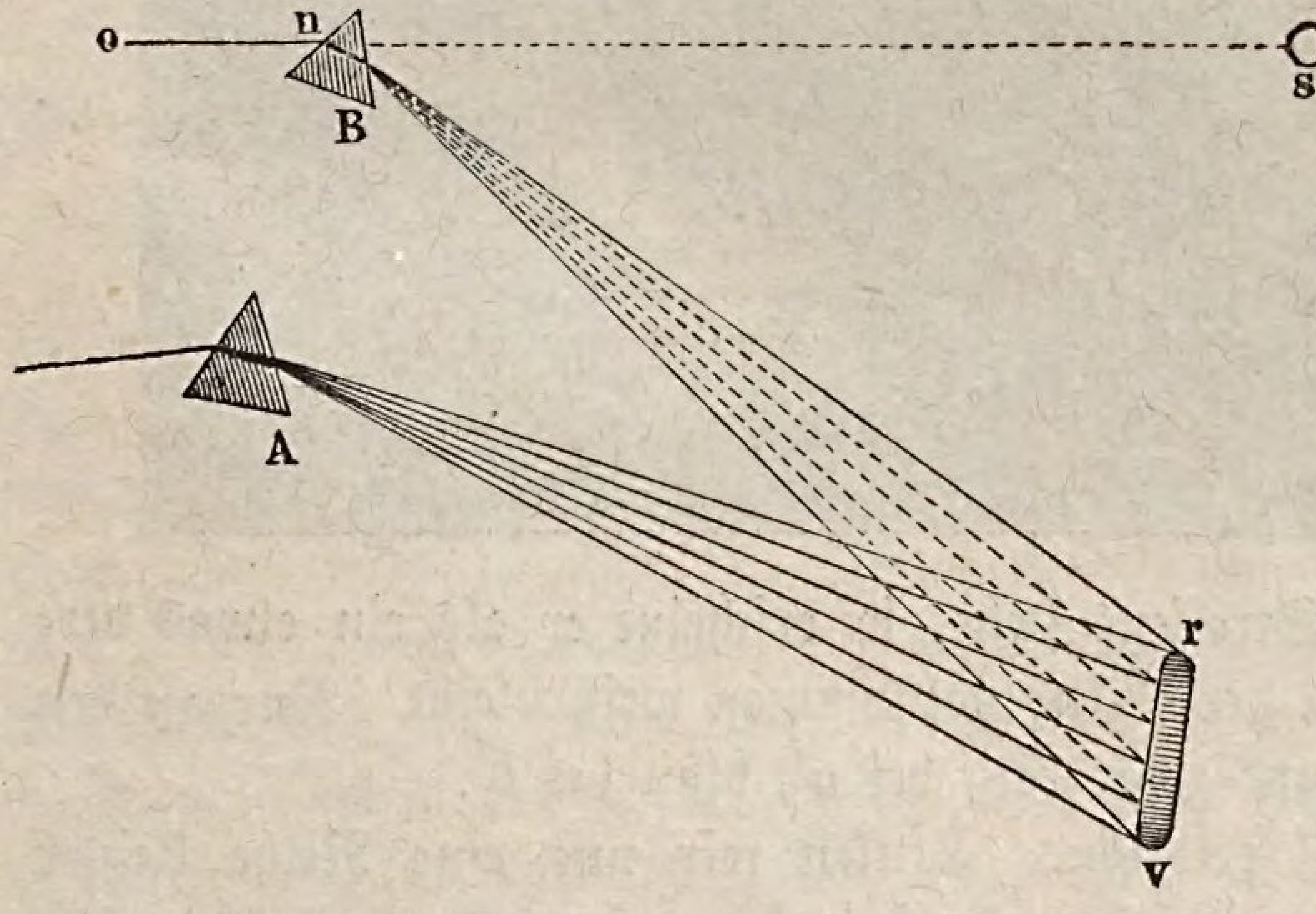
Fig. 311.



Zusammensetzung des weissen Lichtes. Wenn man das Spectrum mit einer Linse *l*, Fig. 311, auffängt, so werden die verschiedenfarbigen von einem Punkte *s* der Prismenfläche aus divergirenden Strahlen durch dieselbe in einem Punkte *f* wieder vereinigt. Stellt man hier einen weißen Papierschirm auf, so erblickt man auf demselben ein blendend weißes Bild der Austrittsfläche des Prismas. Die sämmtlichen Farben des Spectrums geben also bei ihrer Vereinigung wieder weißes Licht. **146**

Daß die prismatischen Farben zusammen Weiß geben, geht auch aus dem sehr überraschenden, ebenfalls von Newton angegebenen Versuche hervor, daß das lange prismatische Farbenbild, wenn es durch ein zweites Prisma betrachtet wird, unter den geeigneten Umständen wieder vollkommen weiß erscheint. In Fig. 312 sei *rv* ein durch das Prisma *A* hervorgebrachtes Spectrum, welches auf einer weißen Wand aufgefangen ist. Wird nun ein zweites

Fig. 312.

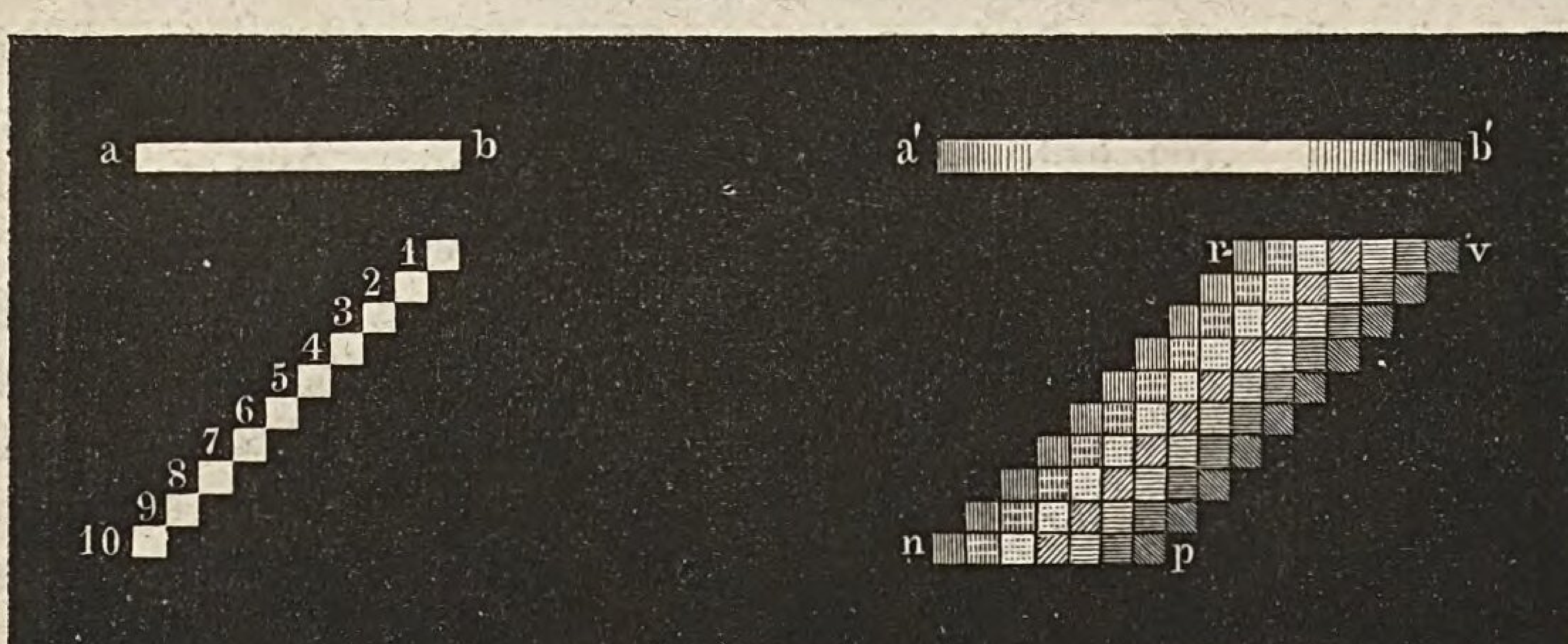


Prisma B so aufgestellt, daß dasselbe Spectrum rv an derselben Stelle entstünde, wenn ein Sonnenstrahl in der Richtung on darauf fiele, so ist klar, daß auch die Strahlen, die von dem Spectrum rv auf dieses Prisma B fallen, sämmtlich in der Richtung no austreten werden; ein in o befindliches Auge muß also in der Richtung ons ein weißes Bild des farbigen Spectrums sehen. Die Stellung, die man dem Prisma B geben muß, läßt sich leicht durch den Versuch ausmitteln.

Wenn man eine kreisförmige Scheibe in sieben Sectoren theilt und diese mit Farben bemalt, die den prismatischen möglichst ähnlich sind, so erscheint die Scheibe bei rascher Rotation nicht mehr farbig, sondern weißlich; sie würde vollkommen weiß erscheinen, wenn die Sectoren mit den reinen prismatischen Farben bemalt werden könnten, und wenn die Breite der einzelnen farbigen Sectoren genau in demselben Verhältniß zu einander ständen wie die Breiten der entsprechenden Theile des Spectrums. Um nach demselben Principe mit reinen prismatischen Farben zu experimentiren, kann man das Prisma mit einem Uhrwerke in Verbindung bringen, durch welches es in eine rasche oscillirende Bewegung versetzt wird. Durch diese Bewegung des Prismas geht nun auch das auf einem Schirme aufgefangene Spectrum rasch hin und her, und da zeigt sich denn statt des farbigen Spectrums ein weißer Lichtstreifen, der nur an den Enden noch etwas farbig erscheint. Das Auge empfängt nämlich von jedem Punkte des Schirmes rasch nach einander die Eindrücke aller einzelnen Farben, die einzelnen Eindrücke vermischen sich und bringen so die Empfindung von Weiß hervor.

Wenn man einen schmalen weißen Streifen durch ein Prisma betrachtet, dessen brechende Kante mit der Längsrichtung des Streifens parallel ist, so erscheint er als ein vollständiges Spectrum. Betrachtet man aber denselben weißen Streifen ab, Fig. 313, durch ein Prisma, dessen brechende Kante rechtwinklig

Fig. 313.



auf der Längsrichtung des Streifens steht, so erscheint er als ein etwas verlängerter Streifen, welcher in der Mitte vollkommen weiß bleibt. Nur an den Enden ist er etwas gefärbt, und zwar roth bei a', blau bei b'.

Es läßt sich dies leicht erklären. Denken wir uns eine Reihe kleiner weißer Quadrätchen auf schwarzem Grunde so zusammengestellt, wie es unsere

Figur zeigt, so wird jedes derselben, durch ein Prisma betrachtet, ein vollständiges Spectrum bilden. Ist die brechende Kante parallel mit der verticalen Kante der Quadrätchen, so erscheint das oberste Quadrat als Spectrum in *rv*, und jedes nach unten folgende giebt ein gleiches, nur gegen das obere etwas nach links verrücktes Spectrum, wie es unsere Figur zeigt. Das unterste weiße Quadrätchen giebt das Spectrum *np*.

Denken wir uns nun alle Quadrätchen vertical in die Höhe geschoben, bis sie mit 1 einen horizontalen Streifen bilden, welcher dem Streifen *ab* gleich ist, so werden nun auch alle die Spectra über einander geschoben, welche den einzelnen weißen Quadrätchen entsprechen. Auf das Indigo im Spectrum des ersten Quadrates fällt das Violett aus dem Spectrum des zweiten. Auf das Blau im Spectrum des ersten Quadrates fällt das Indigo aus dem Spectrum des zweiten, und das Violett aus dem Spectrum des dritten u. s. w. In dem mittleren Theile fallen endlich alle Farben auf einander; so fällt z. B. auf das Roth des Spectrums des ersten Quadrates das Orange aus dem Spectrum des zweiten, das Gelb aus dem Spectrum des dritten, das Grün, Blau, Indigo und Violett aus dem Spectrum des vierten, fünften, sechsten und siebenten Quadrates; hier wie in dem ganzen mittleren Theile des durch Aufeinanderschieben der einzelnen Spectra entstehenden Streifens muß also Weiß gebildet werden, welches, wie man aus dem Anblicke der Figur leicht ableiten kann, am einen Ende durch Gelb in Roth, am anderen durch Blau in Violett übergehen muß, welche letztere Farbe aber meist wegen ihrer Lichtschwäche kaum merklich ist.

Was hier von dem weißen Papierstreifen gesagt ist, gilt von jedem weißen Gegenstande von einiger Ausdehnung; betrachtet man einen solchen durch ein Prisma, so erscheint er nur an den Rändern gefärbt.

Ein breiter schwarzer Streifen auf weißem Grunde bietet, durch ein Prisma betrachtet, gerade die umgekehrten Erscheinungen dar; das prismatische Bild erscheint nämlich an dem Ende, welches am wenigsten abgelenkt ist, mit einem violetten und blauen Rande, am anderen Ende aber mit einem rothen und gelben. Um diese Umkehrung zu erklären, braucht man nur zu bedenken, daß die Farben nicht von dem schwarzen Streifen selbst, sondern von den weißen Rändern herrühren, die ihn begränzen. Wenn der schwarze Streifen selbst sehr schmal ist, so verschwindet im Bilde das Schwarz in der Mitte vollständig.

Complementäre Farben. Da alle einfachen Farben, wenn sie 147
in dem Verhältnisse vereinigt werden, wie sie im Sonnenspectrum enthalten sind, weißes Licht bilden, so reicht es hin, eine oder mehrere der einfachen Farben zu unterdrücken oder nur ihr Verhältniß zu ändern, um aus Weiß irgend einen Farbenton zu machen. Fängt man einen Theil des von *s*, Fig. 311, aus auf die Linse *l* fallenden Spectrums, etwa alle Strahlen von der Mitte des Grün bis zum rothen Ende mit einem Blatt Papier auf, ehe sie die Linse treffen, so wird das vorher weiße Bild bei *f* nun eine blaue Färbung annehmen; dagegen wird es gelb, wenn man die Strahlen von der Mitte des Grün bis zum violetten Ende auffängt. Dieser gelbe Farbenton enthält alle

Bestandtheile, welche zu jenem blauen noch hinzugefügt werden müssen, um diesen zu Weiß zu ergänzen. Zwei Farbentöne, welche diese Bedingung erfüllen, d. h. welche zusammengenommen Weiß geben, werden deßhalb auch **complementäre** Farben, oder **Ergänzungsfarben** genannt. Jede Farbe hat auch ihre complementäre; denn wenn sie nicht weiß ist, so fehlen ihr gewisse Strahlen, um Weiß zu bilden, und diese fehlenden Strahlen zusammengenommen machen die complementäre Farbe aus.

Hätte man bei dem obigen Versuch den mittleren Theil des Spectrums, also etwa die Strahlen von der Mitte des Gelb bis zur Mitte des Hellblau aufgefangen, ehe sie die Linse l treffen, so würde man bei f ein **purpurrothes** Bild erhalten haben, während es **grün** wird, wenn man die eben aufgefangenen Strahlen auf die Linse fallen läßt und die Strahlen von der Mitte des Gelb bis zum rothen und von der Mitte des Hellblau bis zum violetten Ende des Spectrums auffängt.

Die Ergänzungsfarben **blauer** Farbentöne sind **gelb**, während die Ergänzungsfarben **grüner** Farbentöne **roth** sind. Je mehr das Blau in Grün übergeht, desto mehr geht seine Ergänzungsfarbe aus Gelb in Roth über.

148 **Fraunhofer'sche Linien.** Um ein schönes Spectrum zu erhalten, verfährt man auf folgende Weise: Vor dem Laden, welcher das Fenster des dunklen Zimmers verschließt, in dem man experimentiren will, ist, wie beim Sonnenmikroskop, Fig. 307 Seite 282, ein Spiegel angebracht, welcher so gerichtet werden kann, daß er die Sonnenstrahlen in horizontaler Richtung durch eine Oeffnung des Ladens ins Zimmer wirft. Als Oeffnung dient ein **verticaler** Spalt von 2 bis 4 cm Höhe und 1 bis 2 mm Breite. Das durch diesen Spalt eindringende Sonnenlicht wird in einer Entfernung von 4 bis 6 m durch ein Prisma von Flintglas oder Schwefelkohlenstoff aufgefangen und in dem Wege des durch das Prisma abgelenkten Strahlenbündels in geeigneter Entfernung ein Schirm von weißem Papier aufgestellt.

Das auf diese Weise erzeugte Spectrum zeigt jedoch die einzelnen Farben noch keineswegs vollkommen rein, denn von jeder Farbe entsteht auf dem Schirme ein Sonnenbild. Die benachbarten Sonnenbilder überdecken sich aber, man beobachtet daher nur Mischfarben, welche einfachem Lichte mehr oder weniger nahe kommen. Damit das Spectrum rein sei, muß von jeder Farbe statt eines runden Sonnenbildes eine zur Breite des Spectrums senkrechte Linie entstehen. Zu diesem Zwecke setzt man, wie Fig. 314 zeigt, unmittelbar vor oder auch unmittelbar hinter das Prisma eine Linse l von 0,8 bis 1,2 m Brennweite und stellt dann den Schirm ab in solcher Entfernung von dem Prisma auf, daß ein scharfes Bild des Spaltes auf dem Schirme entstehen würde, wenn nur vollkommen homogenes Licht durch denselben eindränge. Bei richtiger Stellung des Schirmes zeigt sich nun auf dem Schirme ein prachtvolles Spectrum, welches rechtwinklig zu seiner Längsrichtung von einer Reihe **dunkler Linien** durchzogen ist, von denen Fig. 1 der Spectraltafel die bedeutendsten zeigt.

Die dunklen Streifen im Spektrum wurden zuerst von **Wollaston** (1766 bis 1828) beobachtet, später aber von **Fraunhofer** (1787 bis 1826) genauer untersucht; nach letzterem werden die dunklen Linien im Spektrum gewöhnlich die **Fraunhofer'schen Linien** genannt.

Fraunhofer beobachtete die dunklen Linien nicht nach der oben beschriebenen Methode, sondern er untersuchte die aus dem Prisma austretenden Strahlen mittels eines **Fernrohres**.

Die Apparate, welche man gegenwärtig zur Beobachtung der **Fraunhofer'schen** Linien mittels des Fernrohres benutzt, sind im wesentlichen nach dem durch Fig. 315 veranschaulichten Princip konstruiert. In der Mitte eines,

Fig. 314.

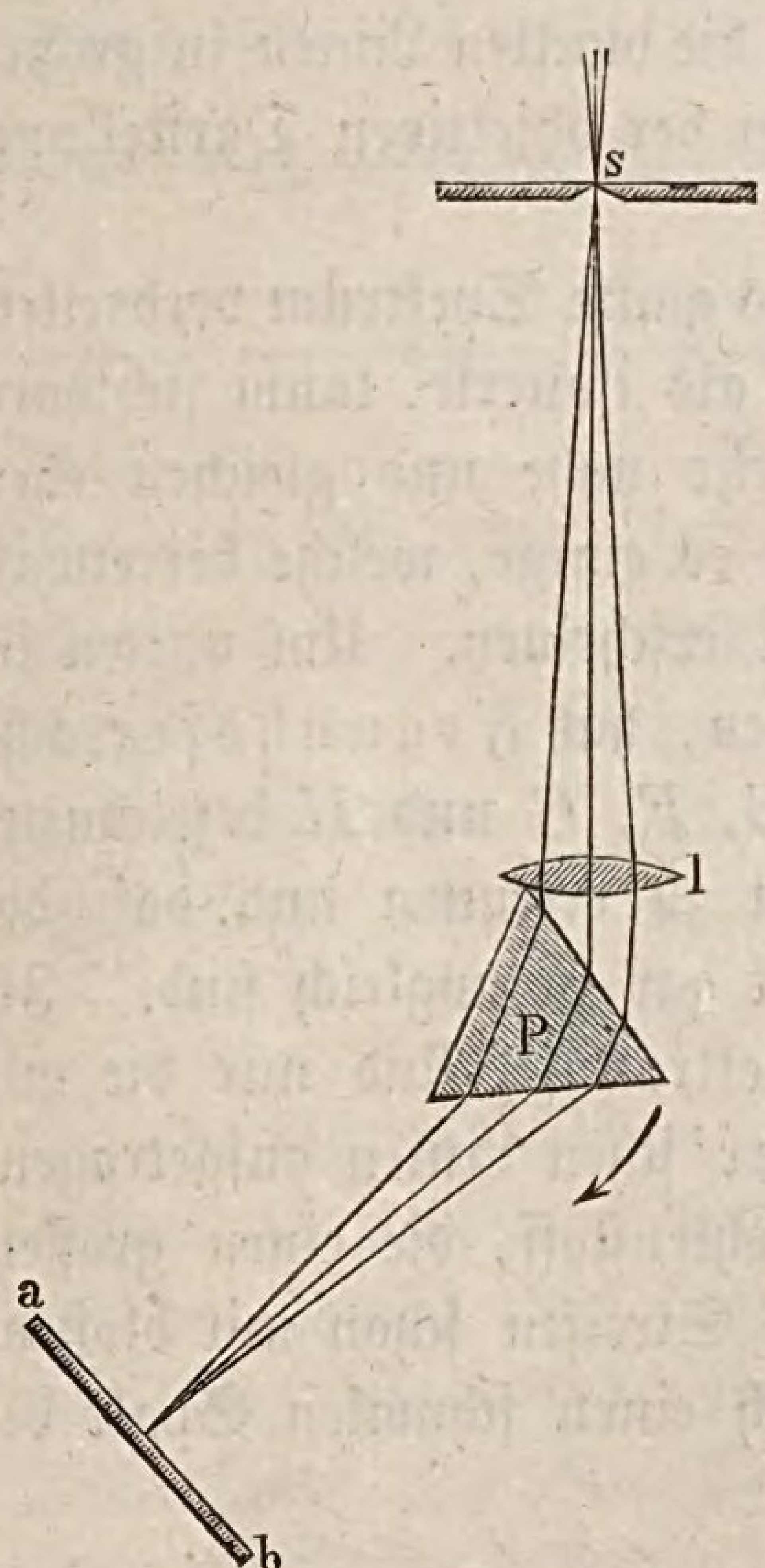
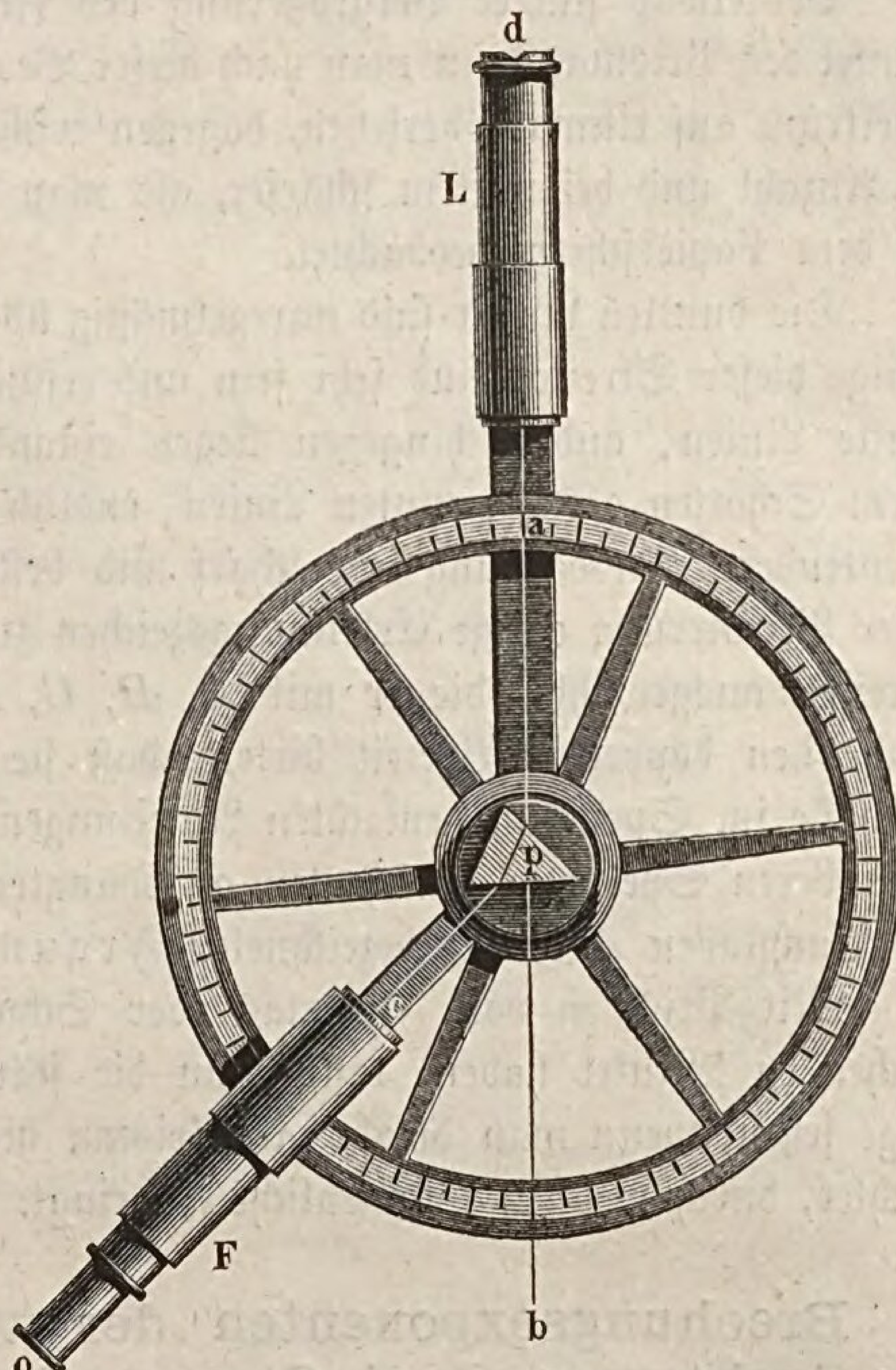


Fig. 315.



von einem passenden Stativ getragenen und horizontal gestellten, geteilten Kreises befindet sich ein um seine vertikale Axe frei drehbares Tischchen, welches als Träger des Prismas p dient. Um diese vertikale Axe dreht sich unterhalb des geteilten Kreises eine Messingschiene, welche das später noch zu besprechende radial gerichtete Rohr L trägt, und oberhalb des geteilten Kreises eine Schiene, auf welcher das Fernrohr F befestigt ist und mit welcher ein in der Zeichnung weggelassener Nonius zusammenhängt.

Kann man sich hinlänglich weit, d. h. mindestens 5 m vom vertikalen Spalte s (Fig. 314) aufstellen, durch welchen die Sonnenstrahlen in den Beob-

achtungsraum eindringen, so ist das Rohr L unnötig und kann auf die Seite geschoben werden. Man bringt nun, ehe noch das Prisma p aufgesetzt ist, die Axe des Fernrohres F in die Richtung db der vom Spalte kommenden Strahlen und zieht dann das Fernrohr soweit aus, daß man das Bild des Spaltes scharf und deutlich sieht. Hierauf wird das Prisma p aufgesetzt und durch Drehen des centralen Tischchens in eine solche Stellung gebracht, daß die auffallenden Strahlen ungefähr das Minimum der Ablenkung erfahren. Wird nun das Fernrohr F aus der Richtung db heraus und so weit gedreht, daß die aus dem Prisma austretenden Strahlen in das Fernrohr fallen, so erblickt man in dem letzteren das von den Fraunhofer'schen Linien durchzogene Spektrum.

Bei etwas starker Vergrößerung des Fernrohres und großem brechenden Winkel des Prismas kann man nach dieser Beobachtungsmethode nicht das ganze Spektrum auf einmal übersehen, dagegen erscheinen die dunklen Linien in größerer Anzahl und bei weitem schärfer, als man sie bei der objektiven Darstellung auf dem Papierschirm beobachtet.

Die dunklen Linien sind unregelmäßig über das ganze Spektrum verbreitet. Einige dieser Streifen sind sehr fein und erscheinen als isolierte, kaum sichtbare dunkle Linien, andere hingegen liegen einander sehr nahe und gleichen eher einem Schatten als getrennten Linien; endlich giebt es einige, welche bei etwas bedeutenderer Ausdehnung sehr scharf und bestimmt erscheinen. Um mitten in dieser Verwirrung einige Erkennungszeichen zu haben, hat Fraunhofer acht Streifen ausgewählt, die er mit A, B, C, D, E, F, G und H bezeichnete, welche den doppelten Vorteil bieten, daß sie leicht zu erkennen und daß die durch sie im Spektrum gemachten Abteilungen nicht gar zu ungleich sind. In dem oberen Spektrum der hinten angehängten Spektraltafel sind nur die mit den Buchstaben A bis H bezeichneten Fraunhofer'schen Linien aufgetragen.

Mit Prismen von Flintglas oder Schwefelkohlenstoff, die einen großen brechenden Winkel haben, kann man die stärkeren Streifen schon mit bloßem Auge sehen, wenn man durch das Prisma hindurch einen schmalen Spalt betrachtet, durch welchen Sonnenlicht eindringt.

149 **Brechungsexponenten der verschiedenen Strahlen des Spektrums.** Da die Strahlen verschiedener einfacher Farben ungleich brechbar sind und somit für dieselbe Substanz verschiedene Brechungsexponenten haben, so ist klar, daß die Angabe der Brechungsexponenten, wie man sie auf Seite 264 findet, nur eine ungefähre sein kann. Wenn es sich um genauere Angaben handelt, müssen die Brechungsexponenten derselben Substanz für verschiedenfarbige Strahlen ermittelt werden; dazu aber sind die Fraunhofer'schen Linien ganz besonders geeignet, weil durch sie bestimmte Stellen des Spektrums fest bezeichnet werden.

Zur Bestimmung des Brechungsexponenten einer bestimmten Fraunhofer'schen Linie sind nun Apparate von der im vorigen Paragraphen besprochenen Konstruktion vorzugsweise geeignet. Zunächst wird die Axe des Fernrohres F

in die Linie db eingestellt, so daß der vertikale Faden des Fadenkreuzes auf die Mitte des Spaltbildes fällt, und nun der Nonius abgelesen; er zeige z. B. auf 140° 9′. Nachdem das Prisma aufgesetzt ist, wird das mittlere Tischchen so gedreht und das Fernrohr F so eingestellt, daß der vertikale Faden seines Fadenkreuzes genau die Fraunhofer'sche Linie deckt, deren Brechungsexponent man bestimmen will, wenn das Prisma für diese Linie auf das Minimum der Ablenkung eingestellt ist. Nachdem z. B. ein Flintglasprisma von 60° aufgesetzt, für die D-Linie auf das Minimum der Ablenkung gestellt und das Fernrohr so gerichtet war, daß der vertikale Faden die D-Linie deckte, zeigte der Nonius auf 188° 45′. Das Minimum der Ablenkung für die D-Linie war also 48° 36′; ihr Brechungsexponent für die Glassorte des fraglichen Prismas ergiebt sich also nach Gleichung 1) auf Seite 269 gleich 1,6242.

Nach genauen Messungen haben die Brechungsexponenten der Fraunhofer'schen Hauptlinien folgende Werte für einige der wichtigsten Stoffe:

	B	C	D	E	F	G	H	Z
Wasser	1,3309	1,3317	1,3336	1,3358	1,3378	1,3413	1,3442	0,0133
Alkohol (sp. Gw. 0,815)	1,3628	1,3633	1,3654	1,3675	1,3696	1,3733	1,3761	0,0133
Crownglas	1,5258	1,5268	1,5296	1,5330	1,5360	1,5416	1,5466	0,0208
Flintglas	1,6277	1,6297	1,6350	1,6420	1,6483	1,6603	1,6711	0,0434
Faraday'sches Glas . .	1,7050	1,7077	1,7148	1,7242	1,7325	1,7498	1,7651	0,0601
Schwefelkohlenstoff . .	1,6182	1,6219	1,6308	1,6439	1,6555	1,6799	1,7020	0,0838

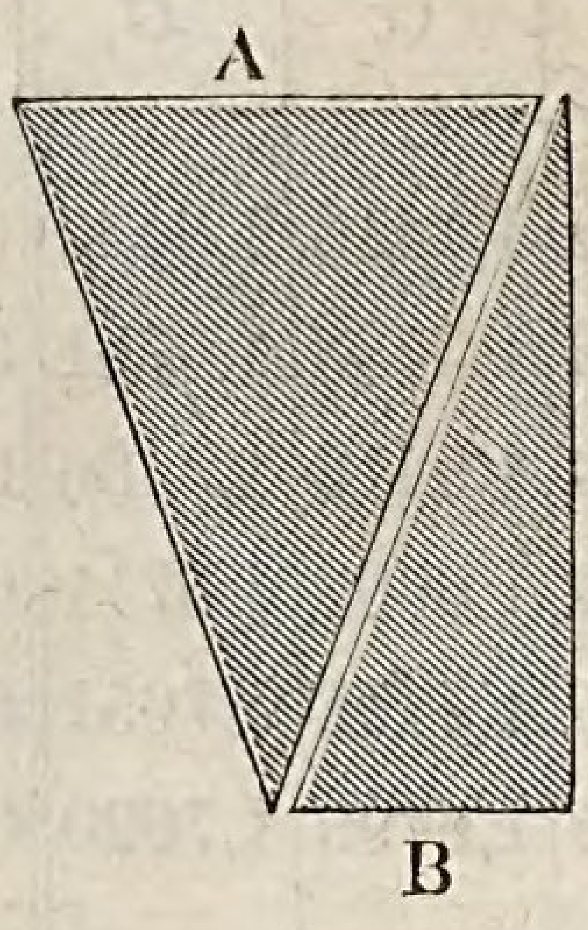
In Betreff der verschiedenen Glassorten sind noch einige Bemerkungen zu machen. Crownglas ist bleifreies Alkali-Kalkglas, während Flintglas statt des Kalkes einen bedeutenden Gehalt an Bleioxyd hat. Das Faraday'sche Glas besteht aus 104 Gewichtsteilen Bleioxyd, 24 Kieselsäure und 25 Borsäure. Da jedoch die Zusammensetzung verschiedener Flintglassorten nicht genau gleich ist, so finden auch kleine Variationen für die Brechungsexponenten statt. Aus demselben Grunde sind auch die Brechungsexponenten verschiedener Crownglassorten nicht immer ganz gleich den oben angegebenen Werten.

Die Trennung der verschiedenfarbigen Strahlen durch Brechung wird mit dem Namen der Dispersion des Lichtes oder der Farbenzerstreuung bezeichnet. Ein Stoff ist um so stärker zerstreuend, je größer die Differenz seiner Brechungsexponenten für rotes und violettes Licht ist. Die Differenzen der Brechungsexponenten der Linien H und B, wie sie in der letzten Kolumne der obigen Tabelle unter Z gegeben sind, sind also ein Maß für die Farbenzerstreuung der Substanz. Unter den oben angeführten Substanzen kommt also dem Wasser und dem Alkohol die schwächste (0,0133), dem Schwefelkohlenstoff die stärkste (0,0838) Farbenzerstreuung zu. Flintglas ist, wie man in obiger Tabelle sieht, stärker zerstreuend als Crownglas.

Aus obiger Tabelle folgt ferner, daß die Farbenzerstreuung verschiedener Substanzen ihrem Brechungsexponenten für die mittleren Strahlen durchaus nicht proportional ist. So ist z. B. der Brechungsexponent von *E* für Flintglas nur 1,07 mal größer als für Crownglas, während die Farbenzerstreuung des Flintglases doch ungefähr doppelt so groß ist als die des Crownglases. — Ferner ist der Brechungsexponent von *E* für Flintglas (1,6420) dem für Schwefelkohlenstoff (1,6439) sehr nahe gleich, während doch die Farbenzerstreuung des Schwefelkohlenstoffs nahe doppelt so groß ist, als die der Flintglassorte, welche in der obigen Tabelle angeführt wurde. Bei gleichem brechenden Winkel wird also ein Schwefelkohlenstoffprisma die grünen Strahlen eben so stark ablenken wie ein Flintglasprisma, obgleich ersteres ein doppelt so langes Spektrum liefert als letzteres.

150 **Achromatismus.** Wenn man zwei Prismen *A* und *B*, Fig. 316, so zusammenstellt, daß ihre brechenden Kanten nach entgegengesetzten Seiten gerichtet sind, so ist die Wirkung dieser Verbindung gleich der Differenz der Wirkungen, welche die einzelnen Prismen hervorbringen.

Fig. 316.



Wenn nun die beiden Prismen aus verschiedenen Substanzen bestehen, so ist es möglich, wenn der brechende Winkel von *A* gegeben ist, den von *B* so zu berechnen, daß entweder

1) für eine bestimmte Strahlenart die durch *A* hervorgebrachte Ablenkung durch *B* aufgehoben wird, während eine Farbenzerstreuung übrig bleibt (Prismen ohne Ablenkung, anapoklitische Prismen), oder

2) daß die von *A* hervorgebrachte Farbenzerstreuung aufgehoben wird, während noch eine Ablenkung übrig bleibt. Kombinationen der zweiten Art werden achromatische Prismen genannt.

Nach dem, was am Schlusse des vorigen Paragraphen gesagt wurde, erhält man eine farbenzerstreuende Kombination ohne Ablenkung, ein anapoklitisches Prisma, wenn man ein Schwefelkohlenstoffprisma mit einem Flintglasprisma von gleichem brechenden Winkel verbindet. Diese Kombination lenkt die grünen Strahlen nicht ab, läßt aber ein Spektrum übrig, welches ungefähr so lang ist, wie das, welches das Flintglasprisma allein erzeugt.

Um eine Kombination der zweiten Art, also um ein achromatisches Prisma zu erhalten, muß man zwei Prismen kombinieren, welche gleich lange Spektra liefern, während die Ablenkung des einen größer ist als die des anderen. Soll z. B. ein Schwefelkohlenstoffprisma *B* ein ebenso langes Spektrum liefern wie ein gegebenes Flintglasprisma *A*, so muß man den brechenden Winkel von *B* bedeutend kleiner machen als den von *A*; infolge davon ist aber auch die von *B* hervorgebrachte Ablenkung bedeutend kleiner als die von *A* bewirkte, *B* kann also die von *A* hervorgebrachte Ablenkung nur teilweise aufheben.

In ähnlicher Weise, wie aus Schwefelkohlenstoff und Flintglas läßt sich

ein achromatisches Prisma auch durch Kombination eines Prismas A von Crownglas mit einem Prisma B von Flintglas herstellen, wenn der brechende Winkel des letzteren in einem entsprechenden Verhältnis kleiner ist als der des ersteren.

Ähnliche Betrachtungen lassen sich nun auch für Linsen anstellen.

Eine jede einfache Linse, aus welchem Stoffe sie auch gebildet sein mag, wird für jede andere Strahlenart auch einen anderen Brennpunkt haben, weil die Brechungsexponenten der verschiedenfarbigen Strahlen nicht gleich sind. Der Brennpunkt der stärker brechbaren blauen Strahlen liegt der Linse näher als der Brennpunkt der roten Strahlen. Fällt also ein Bündel weißes Licht parallel mit der Axe auf eine Konvexlinse ab, Fig. 317, so werden die blauen

Fig. 317.

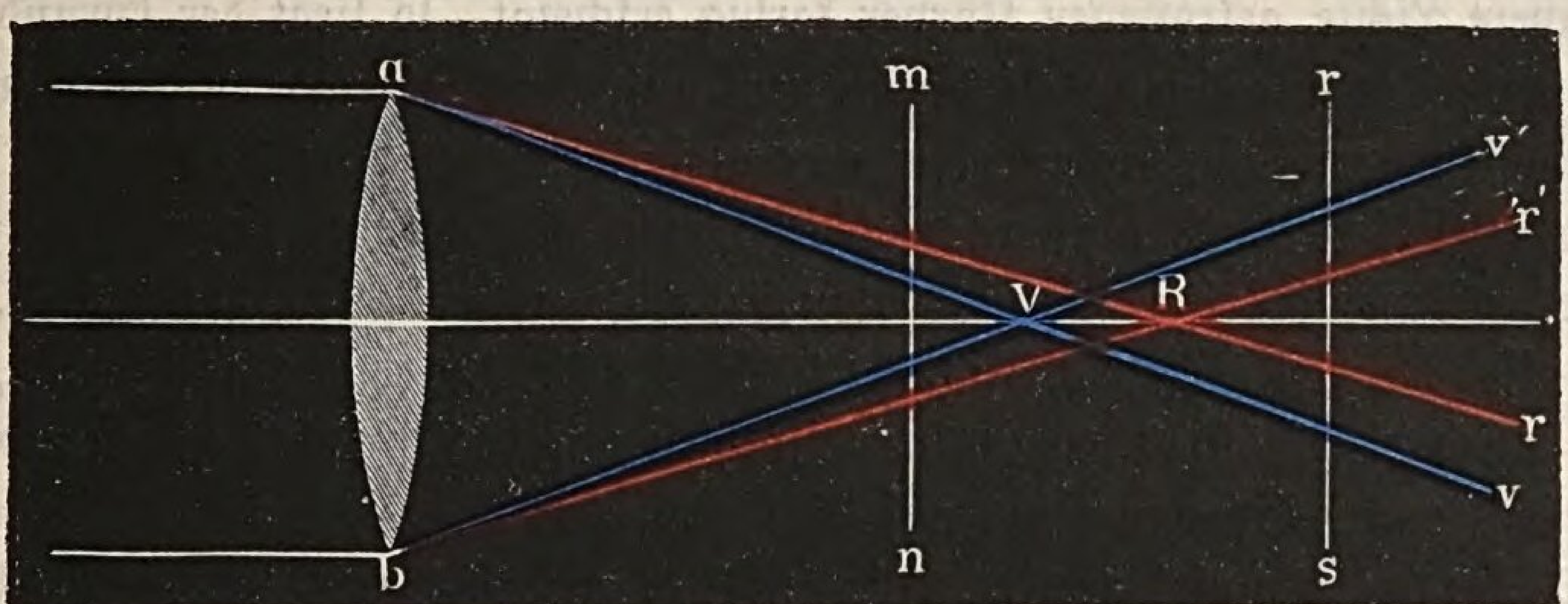
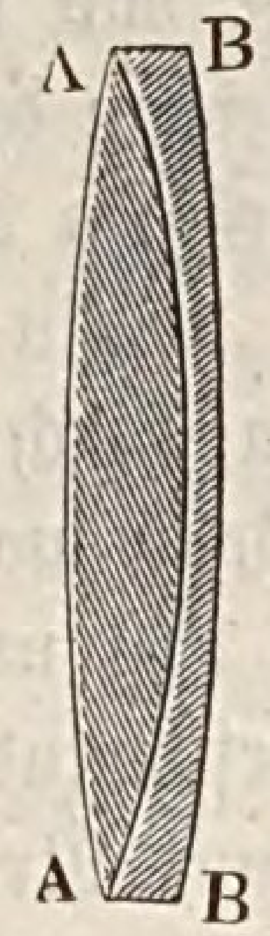


Fig. 318.



Strahlen in V, die roten in R vereinigt. Fängt man den aus der Linse austretenden Strahlenkegel auf einem Schirme auf, so sieht man einen weißen Kreis mit gelbem und rotem Saume, wenn der Schirm zwischen V und dem Glase, etwa bei mn steht; der helle Kreis erscheint dagegen mit einem blauen Saume umgeben, wenn der Schirm sich jenseits R, etwa in rs, befindet, weil vor V die roten und gelben, hinter R die blauen und violetten Strahlen die äußersten des ganzen Strahlenbündels bilden.

Die Ungleichheit der Brennweite der verschiedenfarbigen Strahlen, welche man mit dem Namen der achromatischen Aberration bezeichnet, hat zur Folge, daß die Bilder solcher Linsen mehr oder weniger unrein sind und einen farbigen Saum haben. Man kann sich davon leicht überzeugen, wenn man durch eine stark gewölbte Linse etwa die Lettern eines Buches betrachtet, oder durch eine solche Linse das Bild entfernter Gegenstände auf einer matten Glastafel erzeugt; man wird alles mit farbigen Rändern umgeben sehen. Weil nun aber dadurch die Schärfe der Bilder in Mikroskopen sowohl als auch in Fernröhren sehr leidet, so war die Entdeckung der Konstruktion achromatischer Linsen für die praktische Optik von der größten Wichtigkeit.

Der Achromatismus der Linsen beruht auf denselben Principien wie der Achromatismus der Prismen; achromatische Linsen sind aus einfachen Linsen verschiedener Substanzen zusammengesetzt.

In der Regel werden achromatische Linsen durch Kombination einer Konvexlinse von Crownglas mit einer Zerstreuungslinse von Flintglas

hergestellt, Fig. 318 (a. v. S.), deren letztere eine Zerstreuungsweite hat, welche nahezu doppelt so groß ist als die Brennweite der ersteren. In diesem Falle kann die Flintglaslinse die Konvergenz der aus der Crownglaslinse kommenden Strahlen zwar vermindern, aber nicht aufheben, während die Farbenzerstreuung korrigiert wird, da die zerstreuende Kraft des Flintglases nahezu doppelt so groß ist als die des Crownglases.

Solche Linsenkombinationen werden achromatische Linsen genannt, weil sie reine, von farbigen Säumen freie Bilder geben.

Ausführlicheres über achromatische Linsen findet man in dem entsprechenden Paragraphen des Supplementbandes.

151 **Die natürlichen Farben der Körper.** Wenn ein durchsichtiger von weißem Lichte getroffener Körper farbig erscheint, so liegt der Grund hiervon darin, daß er nur einen Teil der in dem auffallenden Lichte enthaltenen farbigen Strahlen durchläßt, die anderen aber verschluckt oder absorbiert.

Ein rotes Glas z. B. läßt nur rote, vielleicht noch wenige gelbe Strahlen durch; es absorbiert aber Grün, Blau, Indigo und Violett vollständig. Wenn man also vor den Spalt *s*, Fig. 314 Seite 289, ein rotes Glas bringt, so daß nur durch dieses Glas gegangene Strahlen auf das Prisma fallen, so verschwindet das ganze Spektrum bis auf Rot und etwas Gelb, wie das Spektrum Nr. 8 der Farbentafel zeigt. Für dunkler gefärbte rote Gläser fällt auch das Gelb noch ganz fort.

Nr. 9 ist das Spektrum des durch eine Lösung von saurem chromsauren Kali gegangenen Lichtes. Untersucht man auf gleiche Weise die schöne blaue Farbe einer Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd-Ammoniak (die Flüssigkeit muß zwischen parallelen Glasplatten enthalten sein), so verschwindet das rote Ende des Spektrums. Es bleibt nur noch Grün, Blau, Indigo und Violett, wie das Spektrum Nr. 2 der Farbentafel zeigt. Für konzentriertere Lösungen verschwindet noch das Grün und Violett.

Im gleichen Sinne stellt Nr. 3 jener Tafel das Spektrum des Lichtes dar, welches durch eine Lösung von Berliner Blau gegangen ist; Nr 4 stellt das Spektrum einer Indigolösung, Nr. 5 endlich stellt das Spektrum einer durch Kobalt blau gefärbten Glasplatte dar.

Nr. 6 und 7 sind die Spektra zweier grüner Substanzen, nämlich einer Lösung von Chlorkupfer und einer ätherischen Lösung von Blattgrün (Chlorophyll).

Man sieht aus diesen Darstellungen, daß keine der genannten Substanzen homogenes, d. h. einfarbiges Licht liefert, denn sonst müßte sich das ganze Spektrum auf eine einzige farbige Linie reduzieren, wie dies in der That bei einigen farbigen Flammen der Fall ist. Ein rotes Glas z. B. läßt alle Strahlen zwischen den Fraunhofer'schen Linien *D* und *A* oder, wenn es dunkler ist, zwischen *C* und *A* durch, also Strahlen von sehr verschiedener Brechbarkeit. Das blaue Licht, welches durch eine Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd-Ammoniak gegangen ist, besteht aus allen Strahlen zwischen *H* und *E*.

Eine interessante Erscheinung bietet die Indigolösung, deren Spektrum aus zwei getrennten Teilen besteht, nämlich einem schmalen roten Streifen, und dem blauen Ende des Spektrums. Ähnliche Erscheinungen bietet die Lösung von Chlorophyll und das Kobaltglas.

Um die Farben undurchsichtiger Körper durch das Spektrum zu untersuchen, braucht man sie nur bei *rv*, Fig. 308 Seite 283, statt des weißen Schirmes anzubringen. Hält man an diese Stelle ein hochrotes Papier, so sieht man nur noch das rote Ende des Spektrums; da, wo gelbes, grünes, blaues Licht auffällt, ist das Papier ganz dunkel.

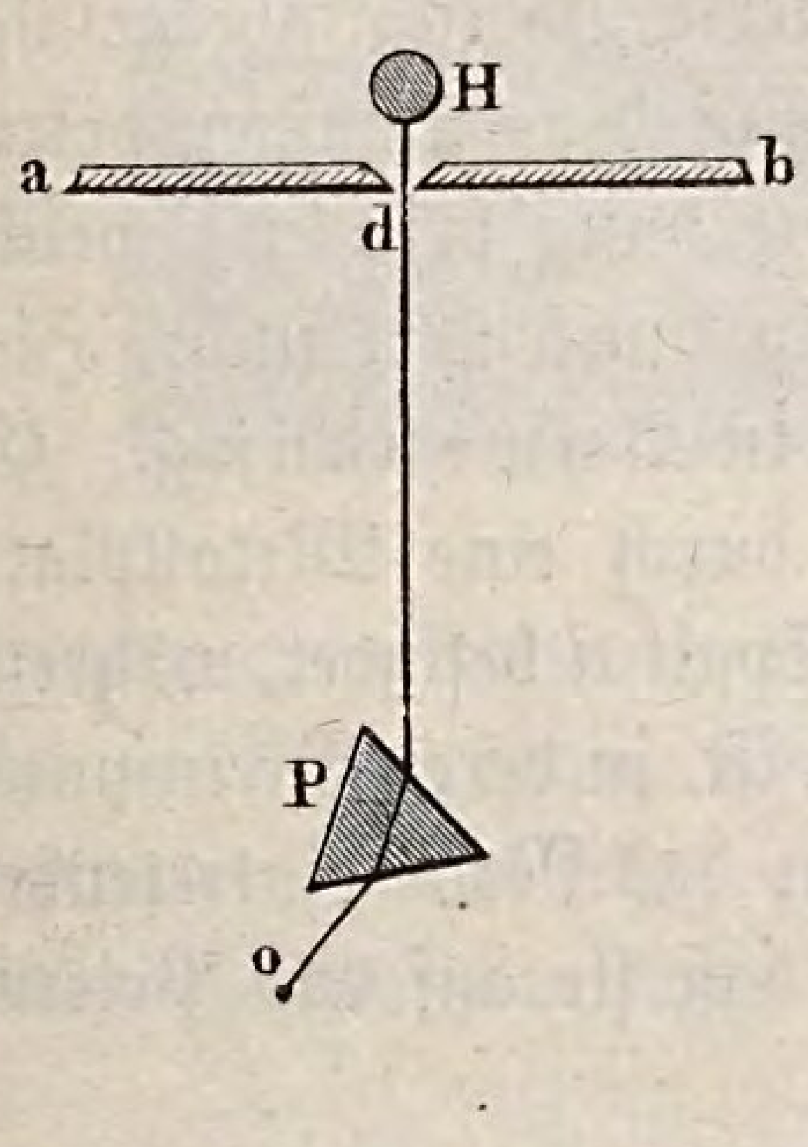
Fängt man das Spektrum durch ein mit Ultramarin gefärbtes Papier auf, so erscheint das Blau am hellsten, die anderen Farben mehr oder weniger dunkel.

Die Lichtabsorption durch farbiges Papier läßt sich am schönsten zeigen, wenn man auf ein weißes Papier einen geradlinig begrenzten Streifen farbigen Papiers aufklebt und den so gebildeten Schirm derart in das Spektrum hält, daß die obere Hälfte des Spektrums auf das weiße, die untere auf das farbige Papier fällt. Nr. 10 der Farbentafel zeigt die Erscheinung, wie man sie beobachtet, wenn man auf die untere Hälfte des weißen Papiers einen roten Papierstreifen aufgeklebt hat. Auf dem weißen Papier erscheint das ganze Spektrum, während auf dem roten Papier alles Violett, Indigo, Blau, Grün und fast alles Gelb absorbiert ist. Das Rot des Spektrums wird aber gleich gut vom weißen und vom roten Papier zurückgeworfen (diffundiert).

Farbige Flammen. Sehr interessante Resultate hat die Unter- 152
suchung farbiger Flammen geliefert. Die Flamme des reinen Weingeistes sowohl, wie die nicht rußende blaue Flamme des Bunsen'schen Gasbrenners ist nur schwach leuchtend; sie wird aber intensiv gelb gefärbt, wenn man Kochsalz auf den Docht der Weingeistlampe streut oder einige Körnchen mittels eines angefeuchteten Platindrahtes in die Flamme des Brenners hält. Durch Lithium- und Strontiumsalze wird die Flamme rot, durch Bariumsalze und durch Kupfersalze wird sie grün gefärbt u. s. w.

Um das Spektrum solcher farbiger Flammen zu untersuchen, verfährt man am einfachsten in folgender Weise. Man stellt die Flamme *H*, Fig. 319, vor einen Schirm *ab*, in welchem in irgend einer Weise ein vertikaler 1 bis 1,5 mm breiter Spalt *d* angebracht ist. Ungefähr 30 cm (der normalen Weite des deutlichen Sehens) hinter dem Spalt wird dann ein Flintglas- oder Schwefelkohlenstoffprisma *P* so aufgestellt, daß seine brechende Kante dem Spalt parallel ist und daß die von *d* auf das Prisma fallenden Strahlen in ihm das Minimum der Ablenkung erleiden.

Fig. 319.



Befindet sich bei *H* eine gewöhnliche Kerzen- oder Lampenflamme, so erblickt man von *o* aus durch

das Prisma hindurch ein vollständiges Spektrum ohne alle Unterbrechung; befindet sich aber bei *H* eine durch ein Natriumsalz gelb gefärbte Flamme, so reduziert sich das ganze Spektrum auf einen einzigen hellen Streifen bei *Na* Nr. 11 der Farbentafel. Ist die Flamme bei *F* durch ein Lithiumsalz rot gefärbt, so reduziert sich ihr ganzes Spektrum auf eine einzige rote Linie bei *Li* Nr. 11. Das Spektrum der Thalliumflamme ist eine einzige grüne (*Th*, Nr. 11), das der Indiumflamme eine blaue Linie (*In*, Nr. 11).

Die durch Natrium gefärbte Flamme sendet also homogenes gelbes, die durch Lithium gefärbte sendet homogenes rotes, die durch Thallium gefärbte sendet homogenes grünes Licht aus.

Das Spektrum der Strontiumsalze, Nr. 12, ist charakterisiert durch einen hellen Streifen im Orange, mehrere Streifen im Rot und eine feinere helle Linie im Blau. Das Spektrum der Calciumsalze ist außer mehreren schwächeren Streifen durch zwei hellere und breitere Streifen ausgezeichnet, von denen der eine im Grün, der andere im Orange liegt. Die Bariumsalze geben ein ganzes Gitter heller Streifen im Grün und Gelb.

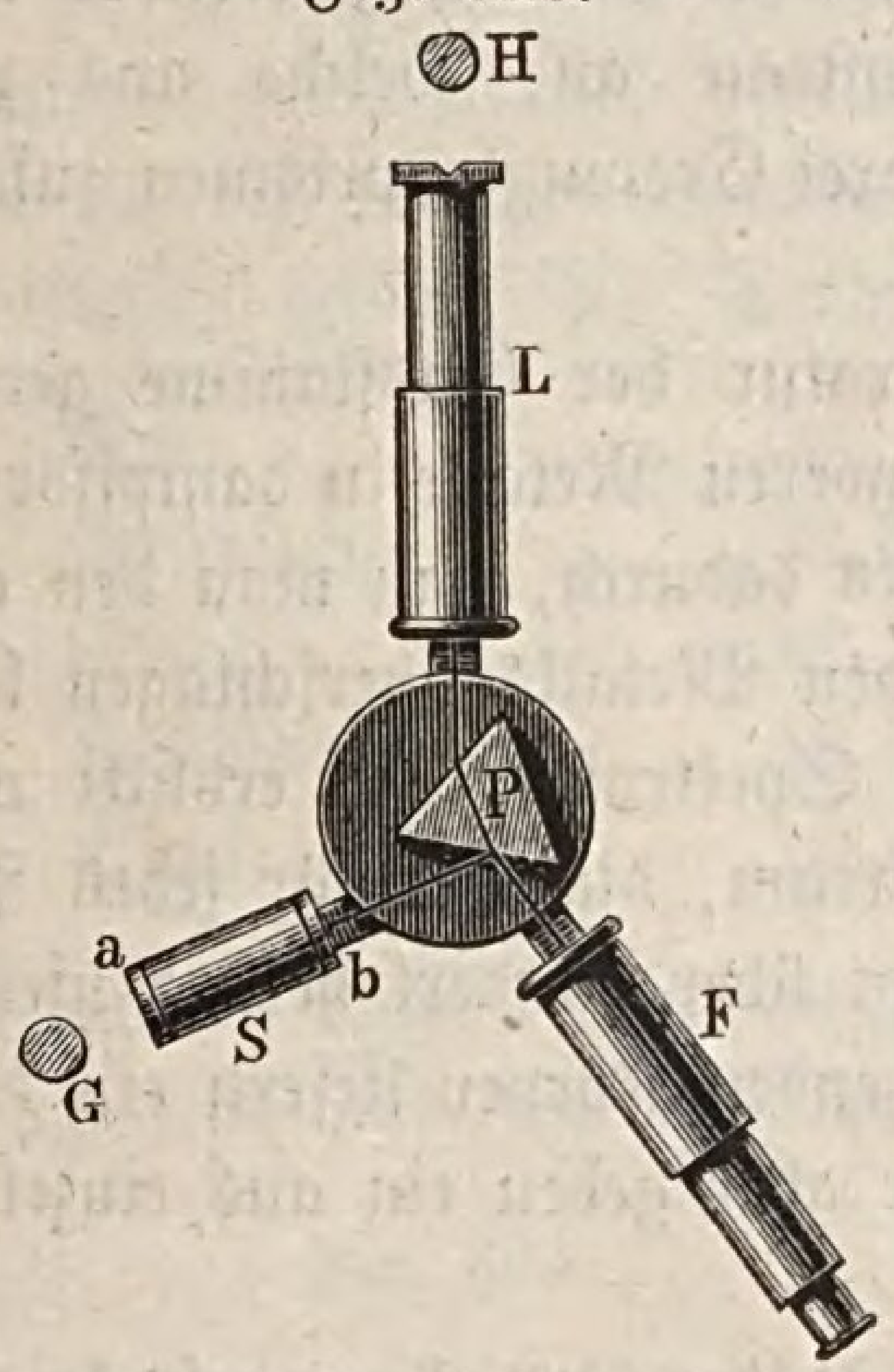
Bunsen hat (1859) die Spektra von Flammen, welche durch die chemisch zu untersuchenden Substanzen gefärbt werden, benutzt, um mittels der charakteristischen hellen Linien die geringsten Mengen der oben genannten und anderer Metallsalze nachzuweisen; er gebraucht also gleichsam das Prisma zur Ausführung qualitativer chemischer Analysen.

Die Spektralanalyse hat bereits zur Entdeckung bis dahin unbekannter Metalle geführt. Bunsen selbst entdeckte in der Mutterlauge einiger Salzsolen das Cäsium und Rubidium, zwei den Alkalimetallen nahe stehende Elemente. Bei der Untersuchung des Schlammes aus Schwefelsäurefabriken, welche Schwefelkiese verarbeiten, beobachtete man eine bis dahin unbekannte grüne Spektrallinie (die grüne Linie in Nr. 11), welche, wie sich alsbald ergab, von einem auf diese Weise neuentdeckten, dem Blei ähnlichen Metall, dem Thallium, herrührt. Die Beobachtung der blauen Linie in Nr. 11 führte zur Entdeckung eines in der Zinkblende vorkommenden neuen silberweißen Metalls, des Indiums, und ebenso die Beobachtung zweier violetter Linien zur Entdeckung eines anderen, in demselben Minerale vorkommenden Metalles, welches Gallium genannt wurde.

Die oben beschriebene und durch Fig. 319 erläuterte Vorrichtung genügt freilich nicht, wenn es sich um eine feinere Beobachtung der Flammenspektra handelt; in solchen Fällen kann man Apparate in Anwendung bringen, welche nach dem durch Fig. 315 Seite 289 erläuterten Prinzip konstruiert sind. Hier kommt nun auch das Spaltenrohr *L*, Fig. 315, in Anwendung. Es ist dies ein Rohr, welches an seinem äußeren Ende durch eine Metallplatte geschlossen ist, in deren Mitte sich ein feiner vertikaler Spalt *d* befindet, während das andere Ende des Rohres durch eine Linse geschlossen ist, in deren Brennpunkt sich der Spalt *d* befindet. Alle divergierend durch *d* in das Rohr eintretenden Strahlen werden durch die Linse parallel gemacht, so daß sie auf das Prisma

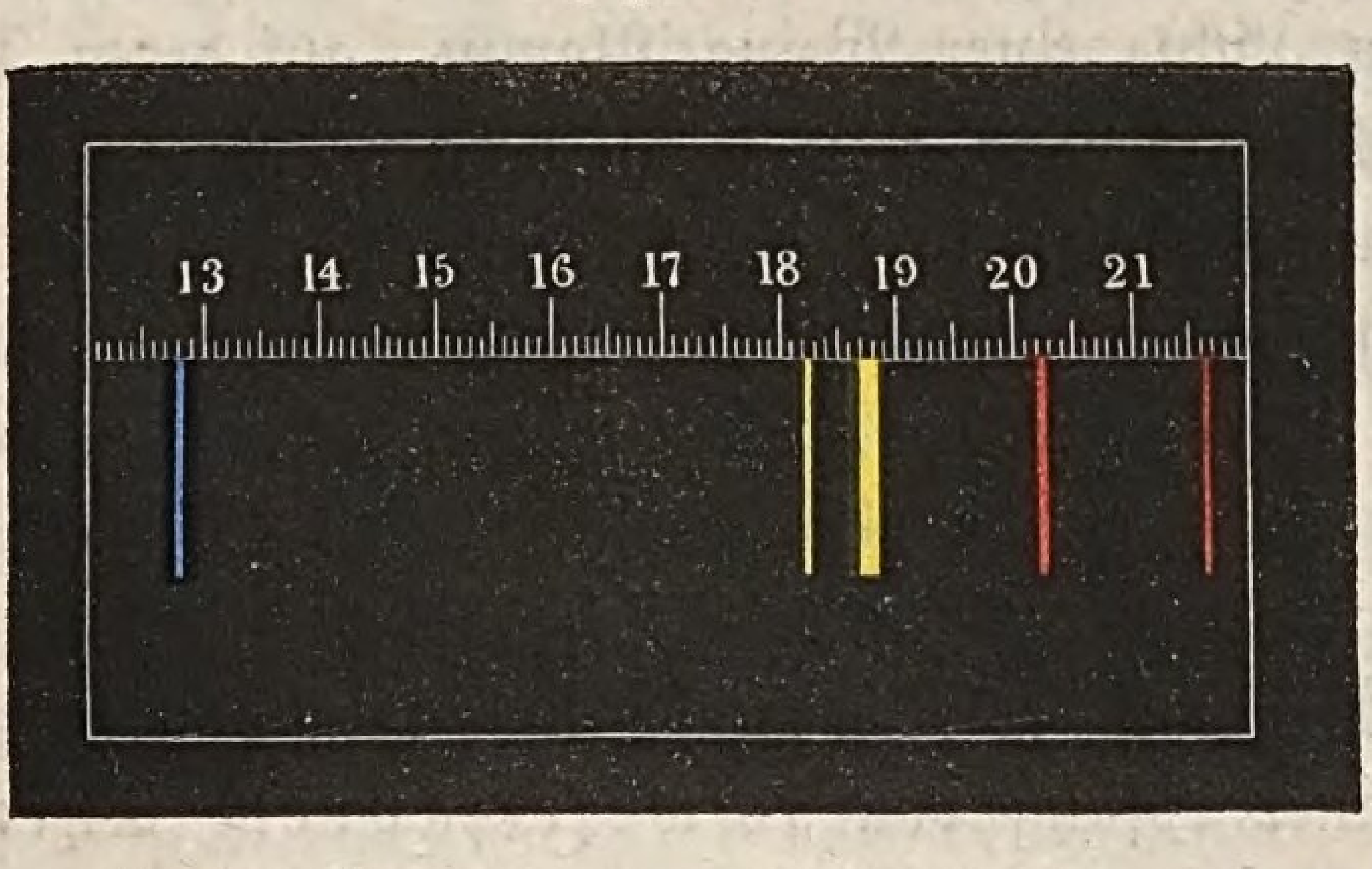
fallen, als ob sie von einem unendlich weit entfernten Spalte kämen. Die farbige Flamme wird in geringer Entfernung von dem Spalte *d* aufgestellt und das Spektrum durch das Fernrohr *F* beobachtet. Für Spektralapparate, wie sie im chemischen Laboratorium gebraucht werden, kann der geteilte Kreis des Instruments Fig. 315 ganz wegbleiben, und dadurch kann der Apparat vereinfacht werden wie Fig. 320 zeigt. Das Spaltenrohr *L* und das Fernrohr *F* können unveränderlich mit dem Stativ verbunden werden, welches das Prisma *P* trägt. Die Vergrößerung des Fernrohres *F* darf aber nicht zu groß sein, so daß man das ganze Spektrum einer Lampenflamme auf einmal übersehen kann, ohne *F* oder *L* zu verrücken.

Fig. 320.



Um nun aber doch die Lage der einzelnen Spektrallinien genauer bezeichnen zu können, hat Bunsen das Spektrum in sehr sinnreicher Weise mit einer Skala in Verbindung gebracht. Bei *S* ist nämlich ein Messingrohr angebracht, welches bei *a* mit einer Glasplatte geschlossen ist, auf deren horizontaler Mittellinie sich eine negative verkleinerte Photographie einer Millimeterskala befindet, deren helle Teilstriche auf dunklem Grunde stehen. Diese Skala ist durch eine bei *G* aufgestellte Lampen- oder Kerzenflamme erleuchtet. Bei *b* ist das Rohr *S* durch eine Linse geschlossen, in deren Brennpunkt sich die kleine Skala bei *a* befindet. Das Rohr *S* ist so gestellt, daß die parallel mit seiner Axe bei *b* aus ihm austretenden Strahlen durch die Vorderfläche des Prismas *P* parallel mit der Axe des Fernrohres *F* reflektiert werden. In das Fernrohr *F* hineinschauend erblickt man also das Bild dieser Skala auf das Spektrum der Flamme projiziert, welche bei *H* aufgestellt ist. Fig. 321 erläutert, wie die verschiedenen Spektrallinien an verschiedenen Stellen der Skala erscheinen, so z. B. die gelbe Natriumlinie bei 18,25 (oder auch 182,5), die rote Lithiumlinie bei 20,24 (oder auch 202,4) u. s. w. (Näheres im Lehrbuch und in den Nachträgen zur 2. Auflage des Supplementbandes.)

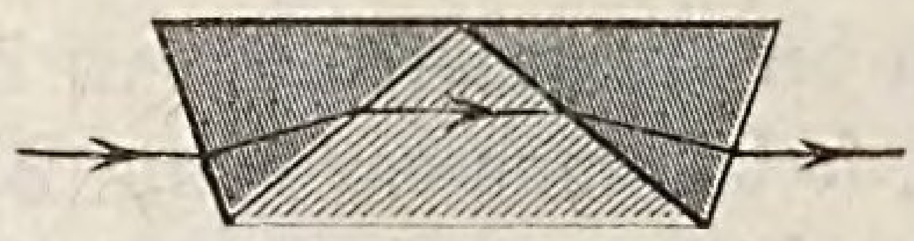
Fig. 321.



Bei allen bis jetzt besprochenen Spektralapparaten wurden die Lichtstrahlen durch das Prisma von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt; in vielen Fällen aber wird die Spektraluntersuchung sehr erleichtert, wenn man in gerader Richtung nach der Lichtquelle hinschauen kann. Man konstruiert deshalb geradlinige Spektro-

skope (spectroscopes à vision directe). Die Kombination eines Prismas von Schwefelkohlenstoff mit einem Flintglasprisma von gleichem brechenden Winkel würde nach §. 150 schon ein geradliniges Spektroskop bilden. Zweckmäßiger aber ist es, wenn man an das Prisma der stärker zerstreuenden Substanz auf beiden Seiten Prismen der schwächer zerstreuenden von entsprechendem brechenden Winkel aufkittet, wie Fig. 322 zeigt. Um das Spektrum noch mehr auszubreiten, wendet man solche Prismensysteme an, welche aus zwei Flintglas- und drei Crownglasprismen zusammengesetzt sind.

Fig. 322.



Die Temperatur der Gasflamme genügt nicht, um die schweren Metalle in dampfförmig glühenden Zustand zu versetzen; man erreicht dies dadurch, daß man den elektrischen Funken zwischen Spitzen des entsprechenden Metalls überschlagen läßt. Beobachtet man einen solchen Funken durch ein Spektroskop, so erblickt man ein aus einzelnen hellen Linien bestehendes Spektrum, die aber für jedes Metall wieder anders sind. Das Eisenspektrum zeigt über hundert helle Linien.

Alle in festem oder flüssigem Zustande glühenden Körper liefern ein kontinuierliches, in Dampfform glühende Körper aber geben ein aus einzelnen hellen Linien zusammengesetztes Spektrum.

Die gelbe Natriumlinie fällt genau mit der *D*-Linie des Sonnenspektrums zusammen; ebenso koinzidieren sämtliche helle Linien des Eisen-, des Magnesiumspektrums u. s. w. mit Fraunhofer'schen Linien des Sonnenspektrums und daraus hat man geschlossen, daß Natrium, Magnesium, Eisen u. s. w. dampfförmig glühend in der Sonnenatmosphäre vorhanden sind. (Näheres darüber im Lehrbuch und in der kosmischen Physik.)

153 **Fluorescenz und Phosphorescenz.** Die meisten Körper reflektieren oder zerstreuen nur solche farbige Strahlen, welche schon im auffallenden Lichte enthalten sind. So verschwindet z. B. das Rot einer Siegellackstange, wenn sie nur von dem gelben Lichte einer Weingeistlampe, auf deren Docht etwas Kochsalz gestreut ist, beleuchtet wird, oder wenn man sie in den grünen oder blauen Teil des Spektrums hält; kurz die Siegellackstange zeigt nur dann ihr Rot, wenn rotes Licht in den auffallenden Strahlen enthalten ist.

Nun giebt es aber einige Körper, welche Farben zeigen, die in dem auffallenden Lichte nicht enthalten sind, welche also gewissermaßen die Farbe des auffallenden Lichtes zu verwandeln vermögen. Solche Körper zeichnen sich durch ein eigentümliches Schillern auf der Oberfläche aus, wie man es z. B. bei dem Petroleum oder einer Lösung von schwefelsaurem Chinin, einem alkoholischen Extrakt von Stechapfelsamen oder einem ätherischen Auszug aus grünen Blättern beobachtet.

Feste Körper, welche diese Eigentümlichkeit besitzen, sind: mit Uran grün gefärbtes Glas (Canarienglas) und einige Varietäten von Flußspath, woher auch der Name Fluorescenz.

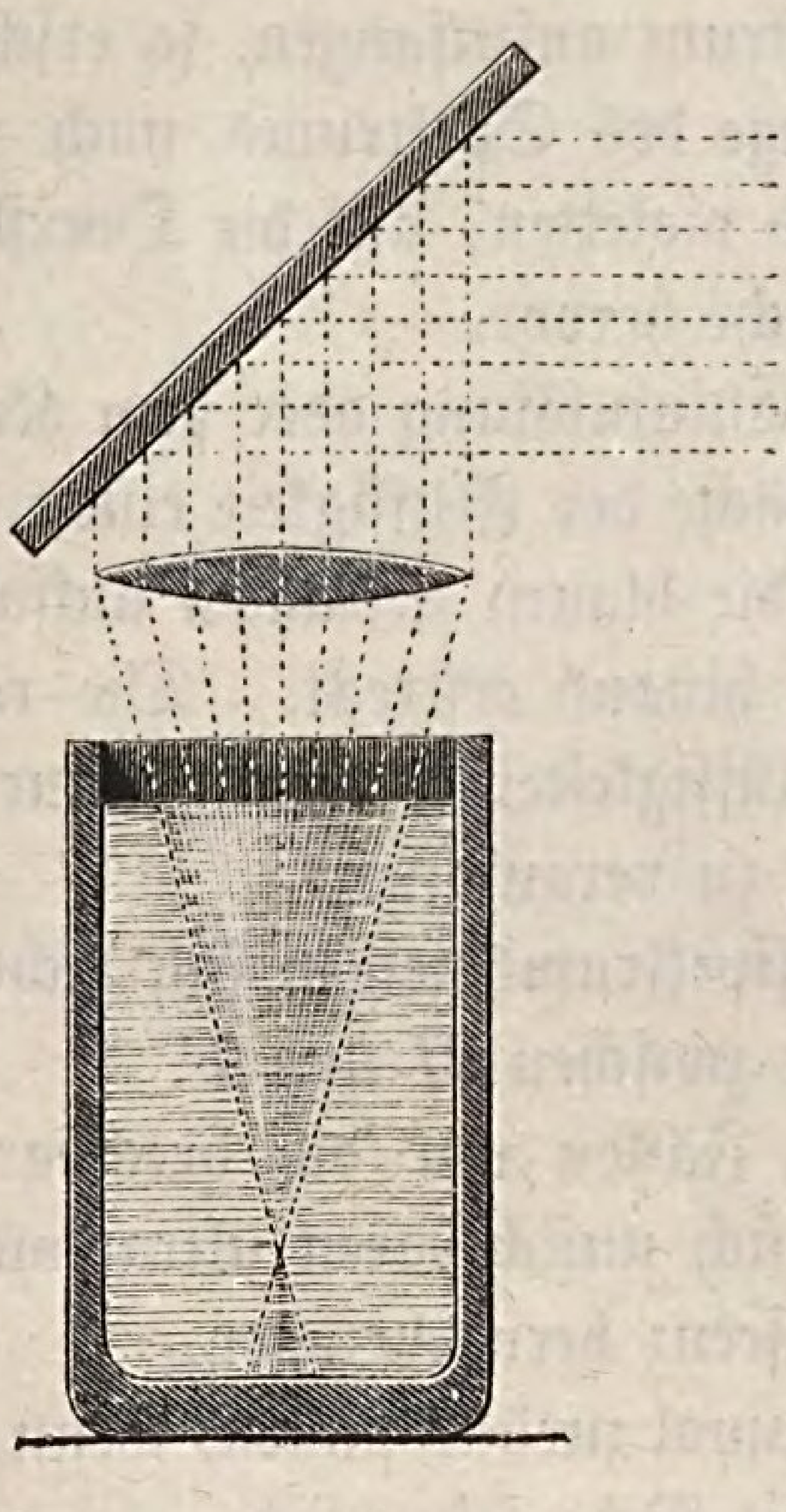
Wenn man einige Stückchen von der Rinde des gewöhnlichen Roßkastanienbaumes mit Wasser übergießt, so wird dieses schon nach einigen Sekunden schön hellblau schillernd. Der Stechapfelextrakt zeigt auf seiner Oberfläche einen grünlichen, das Blattgrün (Chlorophyll) einen roten Schimmer.

Um diesen Farbenschimmer deutlicher zu sehen, konzentriert man mittels einer Linse von 5 bis 10 cm Brennweite ein Bündel Sonnenstrahlen gegen den zu untersuchenden Körper, wie es Fig. 323 andeutet. Der Teil des Strahlenkegels, welcher innerhalb des fluorescierenden Körpers liegt, erscheint dann als ein farbiger Strahlenbüschel, welcher meistens an der Oberfläche am lebhaftesten gefärbt ist. Dieser Büschel zeigt

Rot	im Blattgrünauszug,
Grünlich . . .	in der Stechapfeltinktur,
Grün	im Uranglas,
Hellblau . . .	in der Chininlösung und im Kastanienrindenauszug,
Blau	im Flußspath.

Wenn man auf die angegebene Weise den grünen Lichtkegel im Uranglas erzeugt und nun eine Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd-Ammoniak oder ein blaues Glas dicht vor die Linse hält, so daß nur blaues Licht auf das Glas fällt, so bleibt dessenungeachtet der grüne Lichtkegel sichtbar; das blaue Licht, welches durch die blaue Lösung hindurchgegangen ist, erzeugt also Grün im Uranglas.

Fig. 323.



Betrachtet man den grünen Büschel des Uranglases durch dieselbe blaue Flüssigkeit, so verschwindet er fast vollkommen.

Hält man statt der blauen eine grüne Flüssigkeit, etwa eine Lösung von Chlorkupfer oder grünes Glas vor die Linse, so verschwindet der grüne Büschel im Uranglas; das auffallende grüne Licht kann also den grünen Büschel nicht erzeugen; dagegen bleibt der grüne Büschel durch die grüne Flüssigkeit hindurch sichtbar.

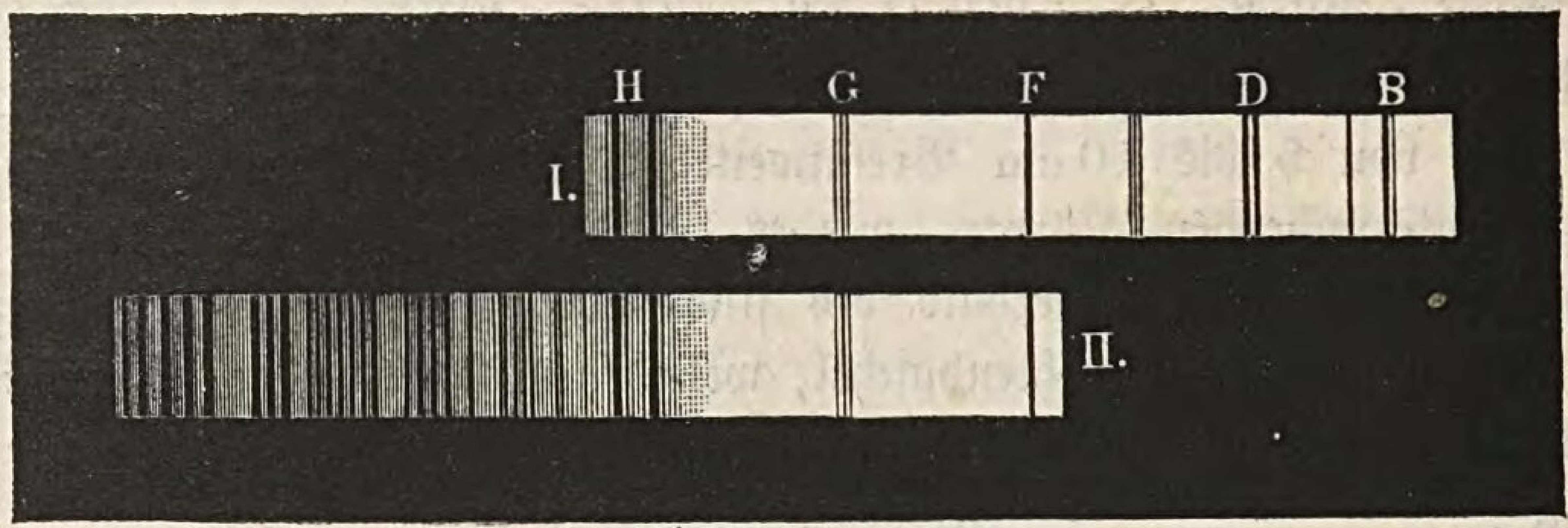
Ähnliche Erscheinungen beobachtet man bei anderen fluorescierenden Körpern.

Am auffallendsten zeigt sich die Wirkung der fluorescierenden Körper, wenn man sie statt eines weißen Schirmes anwendet, um das Spektrum aufzufangen, wenn man sie also an die Stelle *rv*, Fig. 308 Seite 283, bringt.

Hält man an die Stelle des Papierschirms, auf welchem man das Spektrum Nr. I, Fig. 324 (a. f. S.) dargestellt hat, einen Streifen von Uranglas, so erscheint auf diesem der Spektralstreifen Nr. II in Fig. 324, welcher seiner ganzen Ausdehnung nach die gleiche grüne Färbung zeigt. Rot, Orange, Gelb

und Grün gehen ungeändert durch die Glasplatte hindurch, da aber, wo die blauen und violetten Strahlen auffallen, werden sie in zerstreutes grünes Licht

Fig. 324.



verwandelt, so daß sich die Fraunhofer'schen Linien *F*, *G*, *H* auf grünem Grunde zeigen. Aber das grüne Fluorescenzspektrum geht noch weit über die violette Grenze des gewöhnlichen Spektrums hinaus. Das Sonnenlicht enthält also noch eine ziemliche Menge gewöhnlich nicht sichtbarer, ultravioletter Strahlen, welche noch brechbarer sind als die äußersten violetten Strahlen und erst durch die Vermittelung fluorescierender Substanzen sichtbar gemacht werden können.

Bringt man eine Blattgrünlösung in ein von ebenen Glaswänden begrenztes Gefäß, um so mit derselben das Spektrum aufzufangen, so erscheint die Vorderfläche der Flüssigkeit der ganzen Länge des Spektrums nach rot; es bringen also die gelben, grünen, blauen und violetten, auf die Oberfläche der Blattgrünlösung fallenden Strahlen, rotes Licht hervor.

Verfährt man auf gleiche Weise mit der Chininlösung oder dem Kastanienrindenaufguß, so sieht man auf der Vorderfläche der Flüssigkeit einen hellblauen Streifen, welcher sich von der Stelle, wo die blauen Strahlen auffallen, bis weit über die violette Grenze des Spektrums hinaus erstreckt. Die roten, gelben und grünen Strahlen gehen durch diese Flüssigkeiten hindurch, ohne auf der Vorderfläche derselben eine Farbenerscheinung zu veranlassen.

In dem ultravioletten Teil des Fluorescenzspektrums zeigen sich dicht gedrängte Gruppen Fraunhofer'scher Linien, wie zwischen *H* und *F*.

Bemerkenswert ist, daß es in den meisten Fällen nur die brechbareren Strahlen, also die blauen, violetten und die für sich unsichtbaren ultravioletten Strahlen sind, welche die Erscheinung der Fluorescenz hervorbringen.

Wir werden auf diesen Punkt später noch einmal zurückkommen, wenn von den chemischen Wirkungen des Lichtes die Rede sein wird.

In naher Beziehung zur Fluorescenz steht die Phosphorescenz. Schon lange hatte man die Erfahrung gemacht, daß einige Mineralien, z. B. Diamant, manche Varietäten von Flußspath u. s. w. im Dunklen leuchten, wenn sie vorher den Sonnenstrahlen ausgesetzt waren. Man hat diese Erscheinung Phosphorescenz genannt.

Ungleich stärker als alle natürlichen Substanzen phosphorescieren die sogenannten künstlichen Leuchtsteine, welche aus Schwefelcalcium oder aus

Schwefelbarium oder aus Schwefelstrontium bestehen, und zwar müssen diese Substanzen auf trocknem Wege unter dem Einfluß höherer Temperatur dargestellt werden, wenn sie nach der Insolation im Dunklen leuchten sollen.

Wenn man die Leuchtsteine nicht mit weißem, sondern mit farbigem Licht bestrahlt, also die Sonnenstrahlen etwa durch rote, grüne oder blaue Gläser auf jene fallen läßt, so findet man auch hier, daß das Licht, welches der Körper nachher im Dunklen ausstrahlt, nicht demjenigen gleich ist, von welchem er bestrahlt wurde. So leuchtet manches Präparat im Dunklen mit grünem, gelbem oder rotem Licht, nachdem es vorher von blauem Licht bestrahlt worden war.

Hier, wie bei der Fluorescenz, sind es vorzugsweise die stärker brechbaren blauen und violetten Strahlen, welche die Erscheinungen der Phosphorescenz hervorzurufen im Stande sind.

Man kann die Phosphorescenz als eine Fluorescenz bezeichnen, welche noch einige Zeit nach dem Aufhören der Bestrahlung fortdauert.

Auch das elektrische Licht enthält viele Fluorescenz und Phosphorescenz erregende Strahlen.

Fünftes Kapitel.

Vom Auge und den optischen Instrumenten.

154 **Das Gesichtsorgan.** Die Empfindung des Lichtes und der Farbe rührt von der Reizung eines besonderen Nervs, des optischen Nervs oder Sehnervs her, dessen feine Enden auf der Rückwand des Auges zu einer Fläche, der Netzhaut, ausgebreitet sind. Die Empfindung des Dunklen entsteht bei vollkommener Ruhe der Netzhaut, jeder Reiz derselben bringt aber die Empfindung von Helligkeit oder von Licht, hervor; ganz vorzüglich wird dieser Reiz durch die Lichtstrahlen bewirkt, welche die Körper der Außenwelt durch das Auge auf die Netzhaut senden; doch ist auch die Empfindung von Licht und Farbe durch andere Ursachen ohne Mitwirkung der von außen kommenden Lichtstrahlen möglich, z. B. durch den Druck des Blutes (Flimmern vor den geschlossenen Augen). Ein äußerer Druck auf das geschlossene Auge, oder eine elektrische Entladung sind ebenfalls im Stande, Lichtempfindungen hervorzubringen.

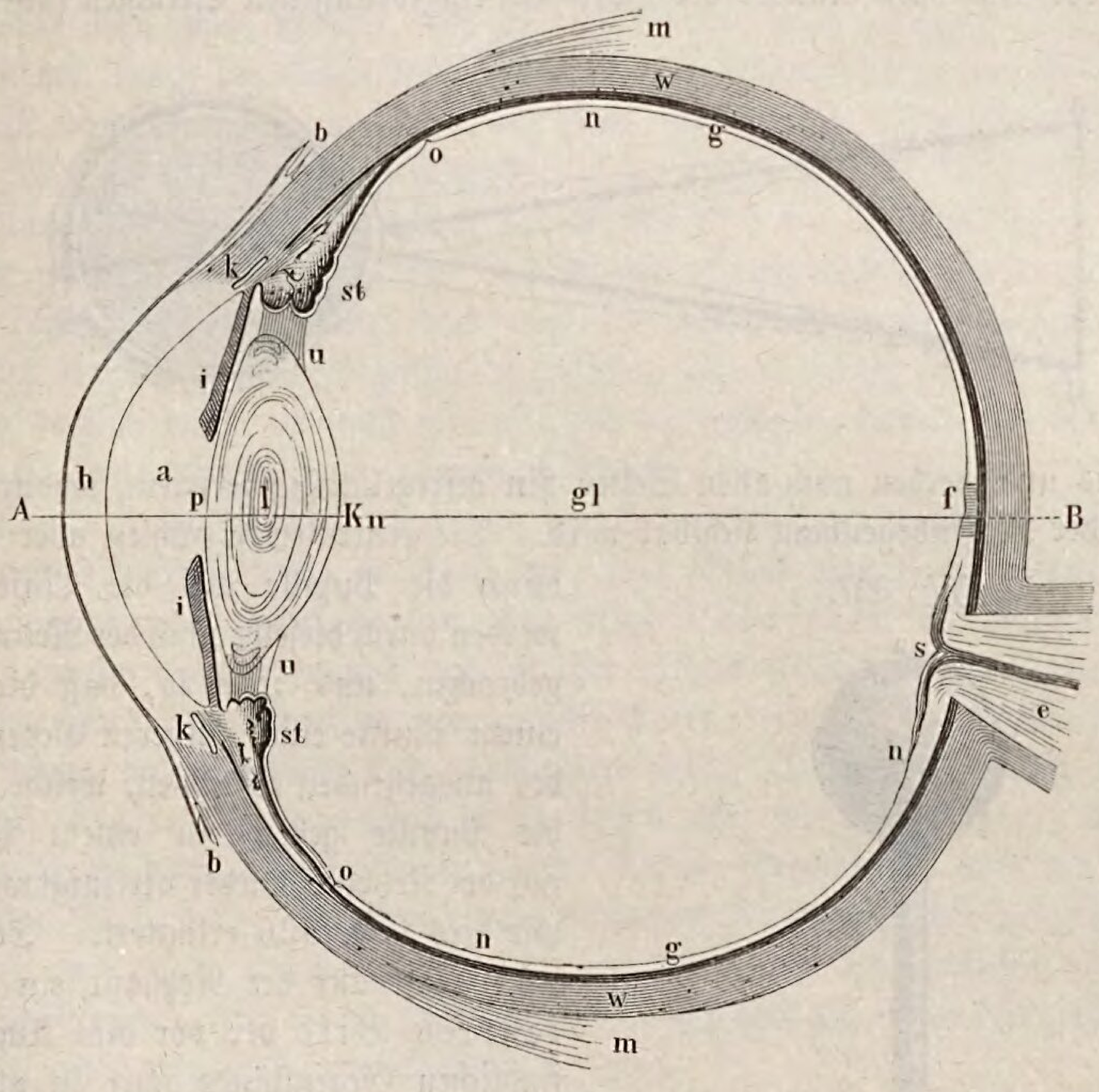
Zur Unterscheidung der äußeren Gegenstände durch das Gesicht reicht es nicht hin, daß die von denselben ausgehenden Lichtstrahlen auf die Netzhaut fallen; es sind lichtsondernde Apparate nötig, welche bewirken, daß die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Strahlen auch die Netzhaut nur in einem Punkte treffen, und daß von diesem Punkte die von anderen Orten herkommenden Lichtstrahlen abgehalten werden; auf diese Weise werden die verschiedenen Stellen der Netzhaut verschieden erregt, und dadurch wird eine Unterscheidung möglich. Wo solche lichtsondernde Apparate fehlen, wie dies bei vielen niederen Tierklassen der Fall ist, da kann kein eigentliches Sehen, sondern nur eine Unterscheidung von Licht und Dunkel, von Tag und Nacht stattfinden; doch sind selbst für eine solche Lichtempfindung noch besondere Nervenapparate nötig.

Nicht bei allen Tierklassen, bei denen ein eigentliches Sehen stattfindet, sind die zur Isolierung der Lichteindrücke bestimmten Apparate auf dieselbe Weise eingerichtet; man unterscheidet zwei wesentlich verschiedene Arten von Augen, nämlich 1. die musivisch zusammengesetzten Augen der Gliedertiere und 2. die mit Sammellinsen versehenen Augen der Wirbeltiere.

Die Untersuchung der musivisch zusammengesetzten Augen ist mehr ein Gegenstand der Physiologie und vergleichenden Anatomie als der Physik; wir wenden uns deshalb sogleich zu den einfachen Augen mit Sammellinsen, mit welchen die höheren Tierklassen und die Menschen versehen sind.

Einfache Augen mit Sammellinsen. Die Konstruktion des 155
Auges ist der einer Camera obscura ganz analog. Der ganze Augapfel ist von einer festen harten Haut umgeben, welche nur auf der Vorderseite durchsichtig ist; dieser durchsichtige Teil wird die Hornhaut (cornea), der weiße undurchsichtige Teil die harte Haut (tunica sclerotica) genannt; die durchsichtige Hornhaut ist stärker gewölbt als der übrige Teil des Augapfels, wie man in Fig. 325 sieht, welche einen horizontalen Durchschnitt des rechten Augapfels darstellt. Hinter der Hornhaut *khk* liegt die farbige Regenbogenhaut *ii* (iris),

Fig. 325.



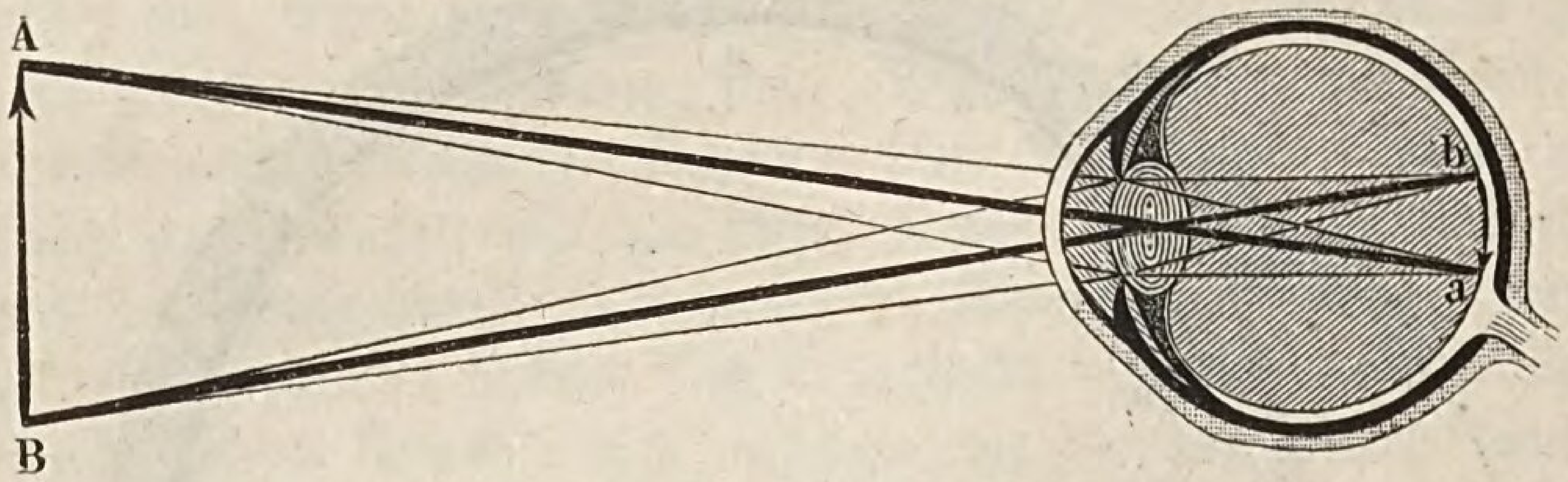
welche flach ist und die Wölbung der durchsichtigen Hornhaut gleichsam von dem übrigen Teile des Auges abschneidet. Die Mitte der Regenbogenhaut bei *p* ist mit einer kreisförmigen Öffnung versehen, welche von vorn vollkommen schwarz (das Schwarze im Auge) erscheint; diese Öffnung führt den Namen der Pupille. Hinter der Iris und der Pupille befindet sich die Krystalllinse *l*; sie ist von einer durchsichtigen Kapsel umgeben, durch welche sie auch an der äußeren Wand des Auges befestigt ist. Der Raum *a* der Linse

und der Hornhaut enthält eine klare, etwas salzige Flüssigkeit, die wässerige Feuchtigkeit (humor aqueus); der ganze Raum *gl* hinter der Linse dagegen ist mit einer durchsichtigen gallertartigen Substanz, der Glasfeuchtigkeit (humor vitreus), angefüllt. Die Krystalllinse selbst ist vorn flacher als hinten.

Ueber der harten Haut *kwwk* ist im Inneren des Auges die Aderhaut (tunica choroidea) ausgebreitet, und über dieser endlich liegt die Netzhaut (retina), welche nur eine Ausbreitung des Sehnervs bei *s* ist. Die Aderhaut, welche die ganze innere Höhlung des Auges bekleidet, ist mit einem schwarzen Pigment überzogen; diese Schwärzung ist nötig, damit nicht durch Reflexionen im Inneren des Auges die Reinheit der Bilder gestört wird. Aus demselben Grunde werden ja auch die Fernröhre innen geschwärzt.

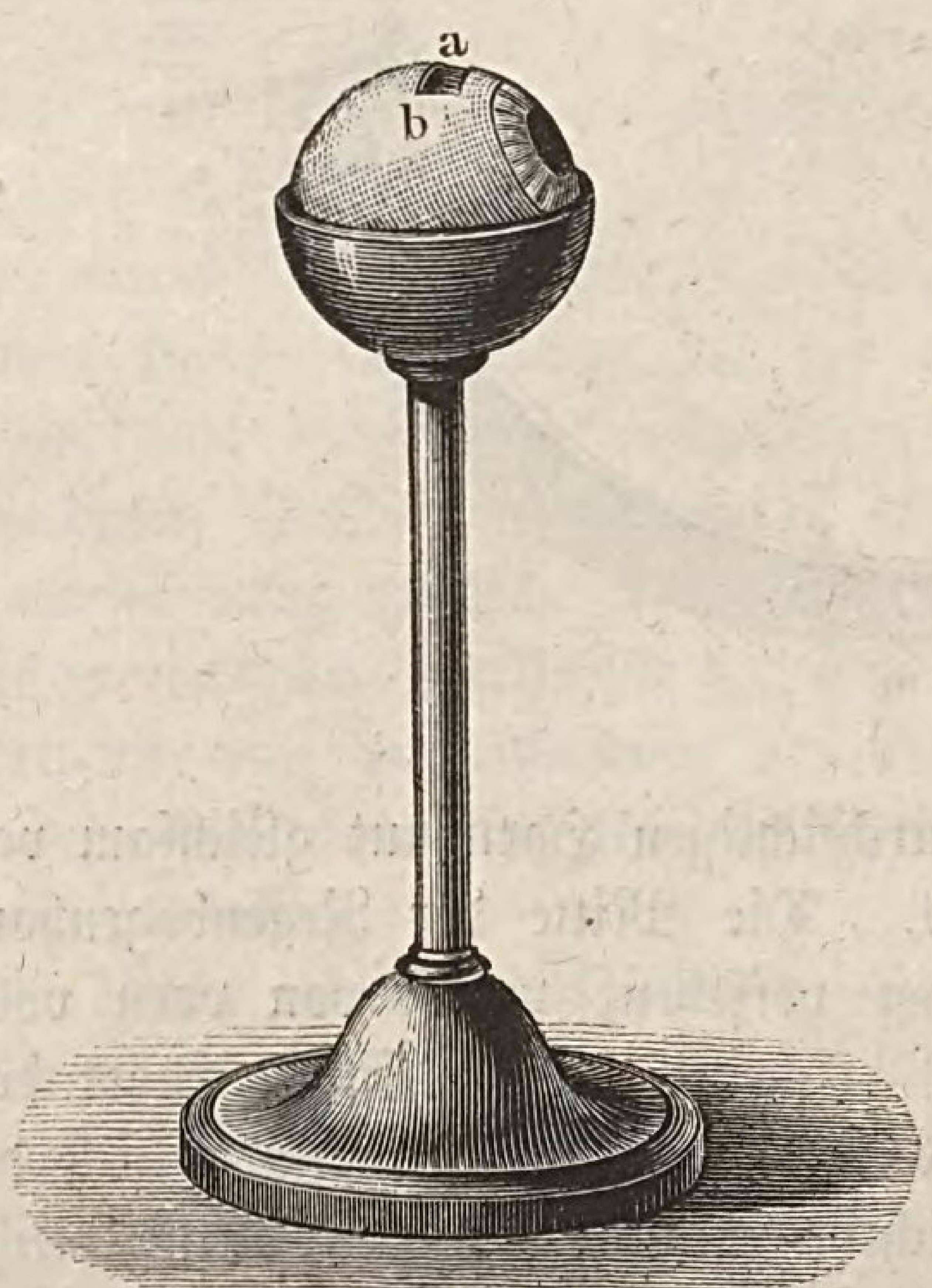
Die Lichtstrahlen, welche auf das Auge fallen, treffen entweder auf den vorderen Teil der Sclerotica, das Weiße im Auge, und werden unregelmäßig nach allen Seiten zerstreut, oder sie dringen durch die Hornhaut in das Auge ein; die in der Nähe des Randes der Hornhaut eingedrungenen Strahlen fallen auf

Fig. 326.



die Iris und werden nach allen Seiten hin unregelmäßig zerstreut, wodurch die Farbe der Regenbogenhaut sichtbar wird. Die centralen Strahlen aber fallen durch die Pupille auf die Linse und werden durch dieselbe nach der Retina hin gebrochen, und zwar so, daß die von einem Punkte eines äußeren Gegenstandes ausgehenden Strahlen, welche durch die Pupille gehen, in einem Punkte auf der Netzhaut wieder vereinigt werden, wie dies Fig. 326 erläutert. So entsteht denn auf der Netzhaut ein verkehrtes Bild der vor dem Auge befindlichen Gegenstände ganz in gleicher Weise wie das Bild auf der Rückwand einer Camera obscura.

Fig. 327.



Man kann sich durch den Versuch an einem etwas großen Tierauge, etwa an einem Ochsenauge, leicht von der Existenz dieses Netzhautbildchens überzeugen; man braucht nur oben bei *ab*,

Fig. 327, eine viereckige Öffnung in die harte Haut zu schneiden und alles Undurchsichtige wegzunehmen, um durch diese Öffnung nach der Netzhaut sehen zu können. Damit das Auge möglichst seine Form behalte, legt man es in die halbkugelförmige Höhlung eines Stativs, wie es die Figur zeigt. Meist quillt die Glasfeuchtigkeit aus der Öffnung ab hervor und verhindert, weil sie nicht mit ebener Fläche begrenzt ist, daß man die Netzhautbildchen deutlich sehen kann. Diesen Übelstand vermeidet man dadurch, daß man ein Glasplättchen auf die Öffnung b legt. — Das Bild der Gegenstände, auf welche das Auge gerichtet ist, sieht man bei diesem Versuche verkehrt auf der Netzhaut. Leicht läßt sich auch das Bild auf der Netzhaut weißsüchtiger Tiere, z. B. weißer Kaninchen, zeigen, bei welchen das schwarze Pigment der Aderhaut fehlt, während zugleich der hintere Teil der Sclerotica durchscheinend ist. An solchen Augen sieht man die Netzhautbilder ohne weitere Präparation.

Accommodation, Kurzsichtigkeit und Fernsichtigkeit. 156

Wir haben oben schon gesehen, daß das durch eine Linse erhaltene Bild seine Lage ändert, wenn der Gegenstand genähert oder entfernt wird; das Bild entfernt sich nämlich um so mehr von der Linse, je näher der Gegenstand heranrückt. Da nun das Auge ganz so wirkt wie eine Linse, und wir nur dann scharf sehen können, wenn auf der Netzhaut ein scharfes Bild der Gegenstände entsteht, so sollte man meinen, daß wir nur in einer bestimmten Entfernung die Gegenstände deutlich sehen könnten; doch zeigt die Erfahrung das Gegenteil; ein normales Auge kann alle Gegenstände zwischen 30 cm bis zu unendlicher Entfernung deutlich sehen, es muß also offenbar die Fähigkeit haben, sich den verschiedenen Entfernungen zu accommodieren.

Cramer hat durch Beobachtung der Spiegelbildchen, welche die Vorderfläche und die Hinterfläche der Linse von einer seitlich vom Auge aufgestellten Kerzenflamme geben, nachgewiesen, daß beim Nahesehen die Krystalllinse etwas nach vorn geschoben und zugleich ihre vordere Fläche gewölbter wird.

Für jedes Auge giebt es eine gewisse Entfernung, in welcher es die Gegenstände am schärfsten und deutlichsten sieht. Diese Entfernung nennt man die Weite des deutlichen Sehens oder die Sehweite. Es ist dies die Entfernung, in welche man einen kleinen Gegenstand, etwa ein klein gedrucktes Buch, hält, um es mit unbewaffnetem Auge möglichst gut lesen zu können. Bei einem normalen Auge beträgt die Weite des deutlichen Sehens ungefähr 30 cm. Ein Auge, dessen Sehweite geringer ist, wird kurzsichtig, wenn sie aber größer ist, weitsichtig genannt.

Das undeutliche Sehen der dem Auge ganz nahen Gegenstände rührt, wie schon erwähnt wurde, von der zu großen Divergenz der von den einzelnen Punkten der Gegenstände ausgehenden Strahlen her, so daß die brechenden Medien des Auges nicht im Stande sind, sie hinlänglich konvergent zu machen, um ihre Vereinigung auf der Netzhaut zu bewirken.

Der von einem zu nahe gelegenen Punkte in das Auge eintretende Strahlenkegel konvergiert gegen einen hinter der Netzhaut liegenden Punkt, er wird

also von der Netzhaut in einem Kreise geschnitten, welchen man als Zerstreuungskreis bezeichnet.

Man mache mit einer Stecknadel ein feines Loch in ein Kartenblatt und halte es dicht vor das Auge, so wird man durch dasselbe einen ganz nahe gehaltenen kleinen Gegenstand, etwa ein etwas größeres mikroskopisches Objekt, wie z. B. ein Insektenpräparat, ziemlich scharf sehen, während man den Gegenstand nach Entfernung des Kartenblattes nicht mehr zu unterscheiden vermag. Der Grund liegt darin, daß von jedem Punkte des ganz nahen Gegenstandes aus nur ein ganz schmales Strahlenbündel ins Auge dringt, welches die Netzhaut nur in einem sehr kleinen Kreise trifft, während sich ein großer Zerstreuungskreis auf ihr bildet, wenn das Kartenblatt entfernt ist.

Durch eine feine Öffnung in einem Kartenblatt kann auch ein kurzsichtiges Auge entfernte Gegenstände ziemlich scharf sehen.

Hierher gehört auch der folgende Versuch Scheiner's (oculus sive fundamentum opticum etc. 1652). Wenn man in ein Kartenblatt mit einer Nadel zwei feine Löcher macht, deren Entfernung von einander kleiner sein muß als der Durchmesser der Pupille, und dann die Öffnungen dicht vor das Auge hält, so sieht man einen kleinen Gegenstand, etwa einen Nadelknopf, den man innerhalb der Sehweite vor die Löcher hält, doppelt. Von dem kleinen Gegenstande gelangen nämlich nur zwei ganz feine Strahlenbündel durch die beiden Löcher ins Auge; diese beiden Strahlen konvergieren aber nach einem Punkte, der hinter der Netzhaut liegt, sie treffen also die Netzhaut in zwei verschiedenen Punkten; es sind dies zwei isolierte Punkte des Zerstreuungskreises, welcher auf der Retina entstehen würde, wenn man die übrigen Strahlen nicht durch das Kartenblatt auffinge.

Entfernt man den kleinen Gegenstand mehr und mehr von dem Kartenblatt, so nähern sich die beiden Bilder und fallen ganz zusammen, wenn sich der Gegenstand in der Weite des deutlichen Sehens befindet.

Wird der Gegenstand noch über die Weite des deutlichen Sehens hinaus entfernt, so bleibt das Bild einfach, bis die Entfernung so groß geworden ist, daß sich das Auge für dieselbe nicht mehr accommodieren kann. Eine solche äußere Grenze der Accommodationsfähigkeit giebt es jedoch nur für kurzsichtige, nicht für normale, oder fernsichtige Augen.

Der Scheiner'sche Versuch hat auf die Konstruktion von Instrumenten geführt, welche zur Ermittelung der Sehweite dienen sollen und Optometer heißen. (Näheres über das Optometer im Supplementband.)

Die Kurzsichtigkeit (Myopie) und die Weit- oder Fernsichtigkeit (Presbyopie) sind Fehler, deren Grund wohl am richtigsten in einem mangelhaften Accommodationsvermögen zu suchen ist, was besonders daraus hervorgeht, daß die Gewöhnung des Auges einen großen Anteil an der Ausbildung dieses Fehlers hat. Kurzsichtigkeit entsteht oft dadurch, daß das Sehen in die Ferne vernachlässigt wird; Kinder, welche beim Lesen und Schreiben das Gesicht zu dicht auf das Papier halten, werden infolge davon kurzsichtig. Auch dadurch,

daß man längere Zeit durch ein Mikroskop sieht, kann ein sonst normales Auge vorübergehend kurzsichtig werden.

Das einfachste Mittel, die Fernsichtigkeit und Kurzsichtigkeit zu verbessern, besteht, wie schon bemerkt wurde, darin, daß man eine feine, etwa in ein Kartenblatt gemachte Öffnung dicht vor das Auge hält. Durch dieses Mittel wird jedoch die Schärfe des Bildes auf Kosten der Helligkeit hergestellt.

Ein zweites Mittel sind die Brillengläser, und zwar wendet man bei kurzsichtigen Augen Koncavlinsen, bei fernsichtigen Konvexlinsen an. Bei einem kurzsichtigen Auge fallen die Bilder ferner Gegenstände zuweit vor die Netzhaut, so daß das Auge sich nicht zu accommodieren vermag; man verändert deshalb die Strahlenbrechung im Auge durch vorgesetzte Koncavlinsen in der Weise, daß die ins Auge gelangenden Strahlen stärker divergieren, und macht dadurch ihre Vereinigung auf der Netzhaut möglich.

Bei fernsichtigen Augen fällt das Bild naher Gegenstände zu weit hinter die Netzhaut; man wendet deshalb Konvexgläser an, um die Strahlen im Auge konvergenter zu machen und dadurch ihren Vereinigungspunkt auf die Netzhaut zu bringen.

Je nachdem ein Auge mehr oder weniger kurzsichtig oder weitsichtig ist, muß man stärkere oder schwächere Linsen anwenden; man wählt die Gläser so, daß die Weite des deutlichen Sehens, welche entweder größer oder kleiner ist, als bei einem ganz normalen Auge, durch Mitwirkung der Linsen 25 bis 30 cm, also ebenso groß wird als bei einem normalen Auge.

Die Kurzsichtigkeit kommt am häufigsten im mittleren Lebensalter, die Fernsichtigkeit aber im höheren Alter vor.

Beziehungen zwischen den Empfindungen des Auges und der Aussenwelt. 157 Der Akt des Sehens beruht lediglich darauf, daß die Reizungen der Netzhaut auf eine bis jetzt freilich unerklärte Weise zum Bewußtsein kommen. Eigentlich nehmen wir nur einen bestimmten Zustand der Netzhaut wahr; daß wir aber diese Wahrnehmung nach außen verlegen und die Netzhautbilder gleichsam in Anschauungen der Außenwelt verwandeln, ist Sache eines unmittelbaren Urteils. In diesem Urteile haben wir durch fortwährende übereinstimmende Erfahrungen eine solche Sicherheit erlangt, daß wir die Netzhaut gar nicht als wahrnehmendes Organ empfinden, sondern die unmittelbaren Empfindungen mit dem verwechseln, was nach unserm Urteile die Ursache derselben ist. Die Substitution der Ursache für die Empfindung geschieht ganz unwillkürlich, sie ist uns so zu sagen zur anderen Natur geworden.

Da wir überhaupt für jede Empfindung auf der Netzhaut eine Vorstellung der Außenwelt setzen, so substituieren wir auch für jedes Netzhautbild einen Gegenstand außer uns. Daß wir den Gegenstand, welcher einem bestimmten Netzhautbildchen entspricht, in eine bestimmte Richtung versetzen, ist aber sicherlich ebenso das Resultat fortgesetzter konsequenter Erfahrung, wie die Verlegung der

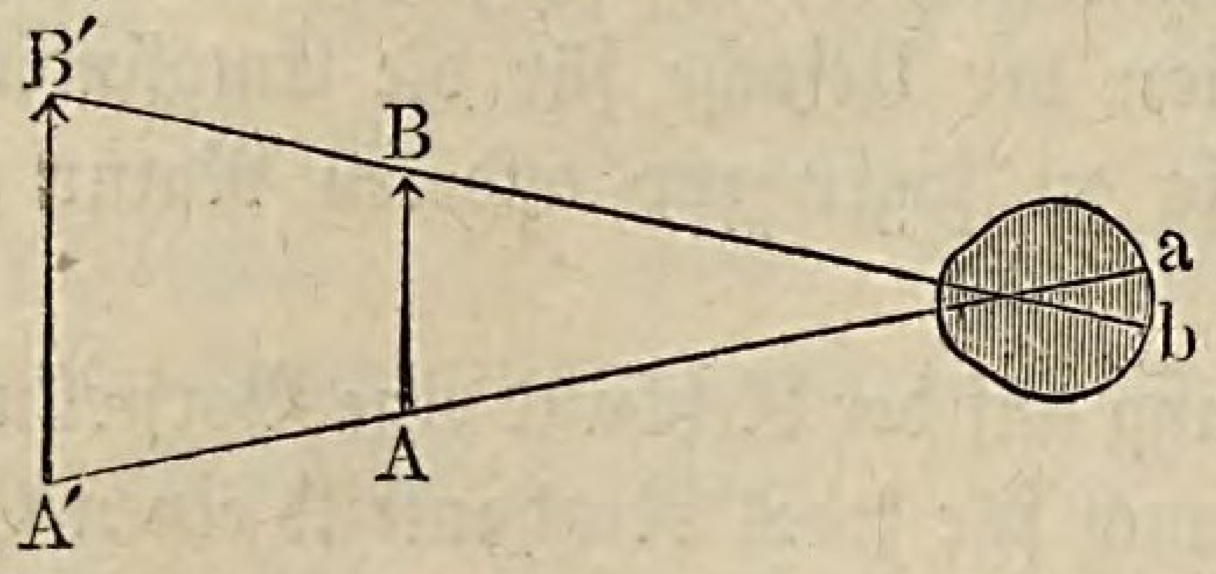
Gesichtsempfindungen nach außen. Denken wir uns den Gegenstand und sein Netzhautbildchen durch eine gerade Linie verbunden, so ist dies die Richtung, nach welcher wir die Bilder nach außen hin projizieren.

Es ist oben gezeigt worden, daß von den äußeren Gegenständen auf der Netzhaut verkleinerte und verkehrte Bilder entstehen, und es ist deshalb die Frage aufgeworfen worden, warum wir nicht alle Dinge verkehrt sehen. Diese Frage findet nun in den eben angestellten Betrachtungen ihre genügende Antwort. Daß überhaupt ein Netzhautbild existiert, daß ein Bildchen auf dem obern oder untern Teile der Netzhaut liegt, oder sich auf der rechten oder linken Seite derselben befindet, erfahren wir erst durch optische und anatomische Untersuchungen; die Empfindung der Netzhaut kommt nicht als solche zum Bewußtsein, sondern sie wird unwillkürlich nach einer bestimmten Richtung nach außen hin projiziert, und zwar in derjenigen Richtung, in welcher sich die Gegenstände befinden, welche die Netzhautbilder veranlassen. Nach dieser Richtung hin finden wir aber die Gegenstände auch durch andere sinnliche Wahrnehmungen, z. B. mittels des Tastsinnes; es besteht also zwischen den verschiedenen sinnlichen Wahrnehmungen in Beziehung auf die Ortsbestimmung die vollkommenste Harmonie; wir würden die Gegenstände verkehrt sehen, wenn diese Übereinstimmung nicht stattfände.

Mit der durch das Gesichtsorgan vermittelten Vorstellung der außer uns befindlichen Dinge verbinden wir auch eine Vorstellung von ihrer Größe und Entfernung. Die Bildchen auf der Netzhaut liegen neben einander; daß wir dessenungeachtet die entsprechenden Gegenstände nicht als neben einander, sondern als hinter einander befindlich erkennen und uns von der flächenhaften Wahrnehmung zu einer Vorstellung der Tiefe des Raumes erheben, ist nicht Sache der Empfindung, sondern des Verstandes. Das Kind hat noch keine Vorstellung von den Entfernungen; es greift nach dem Monde, wie es nach Dingen in seiner Umgebung greift. Die Vorstellung von der Tiefe des Sehraumes erhalten wir erst dadurch, daß wir uns im Raume bewegen, daß sich die Bilder bei dieser Bewegung ändern, und daß wir durch unsere eigene Ortsveränderung einen Begriff von der Entfernung der Gegenstände bekommen.

Die scheinbare Größe der Gegenstände hängt von der Größe des Netzhautbildchens ab. Denken wir uns von den beiden Endpunkten eines Netzhautbildchens Linien nach den entsprechenden Endpunkten des Gegenstandes gezogen, so schneiden sich diese Linien unter einem Winkel, den man den Sehwinkel nennt. Die Größe dieses Winkels ist aber der Größe des Netzhautbildes proportional; man kann deshalb auch sagen, daß die scheinbare Größe der Gegenstände von der Größe des Sehwinkels abhängt, unter welchem sie erscheinen.

Fig. 328.



Zwei Gegenstände von verschiedener Größe, wie AB und $A'B'$, Fig. 328,

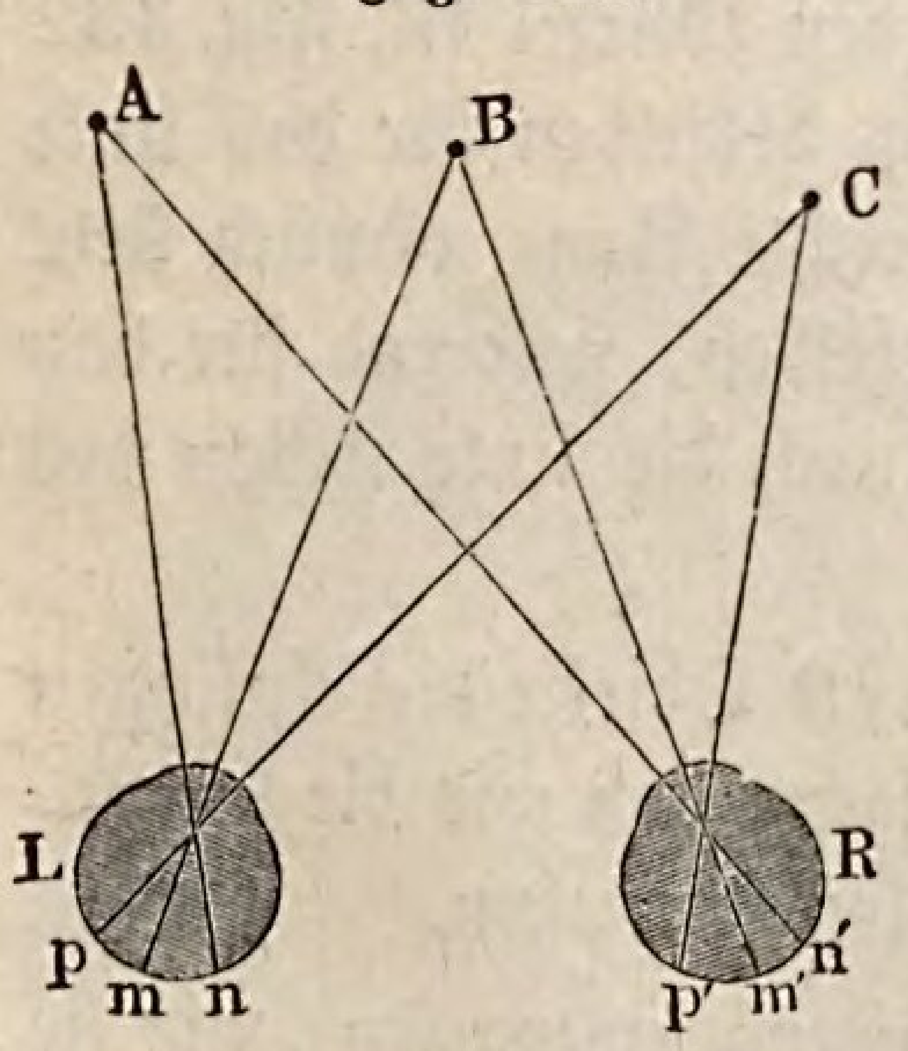
können gleiche scheinbare Größe haben, wenn ihre Größe ihrer Entfernung vom Auge proportional ist. Umgekehrt werden verschiedene Gegenstände, deren Größe sich verhält wie 1 : 2 : 3 in einfacher, doppelter, dreifacher Entfernung unter gleich großem Sehwinkel erscheinen.

Der Punkt im Auge, in welchem sich die Linien aA und bB schneiden, heißt der optische Mittelpunkt des Auges, er ist der Scheitelpunkt des Sehwinkels.

Unser Urteil über die wahre Größe der Gegenstände und ihre Entfernung wird erst durch fortgesetzte Erfahrung erlangt und kann durch Übung einen bewundernswürdigen Grad von Sicherheit erreichen.

Sehen mit zwei Augen. Wenn man mit beiden Augen einen nahen Gegenstand, etwa einen 30 cm weit vor das Gesicht gehaltenen Finger, fixiert, so sieht man alle entfernteren Gegenstände doppelt. 158

Fig. 329.



Umgekehrt sieht man den nahe vor das Gesicht gehaltenen Finger doppelt, wenn man mit beiden Augen einen fernen Gegenstand fixiert.

Das einfache Sehen mit zwei Augen ist nur dadurch möglich, daß jeder Stelle auf der Netzhaut des rechten Auges eine Stelle auf der Netzhaut des linken Auges in der Weise entspricht, daß die Reizungen dieser entsprechenden Stellen sich zu einem einzigen Lichteindruck vereinigen.

Zwei solche korrespondierende Netzhautpunkte sind die in den folgenden Figuren mit m und m' bezeichneten, in denen die Netzhaut von der Linie getroffen wird, welche die Mitte der Hornhaut mit dem Mittelpunkte der Linse verbindet; diese Linie wird deshalb auch Augenaxe genannt.

Andere korrespondierende Punkte liegen ungefähr gleichweit rechts oder

Fig. 330.

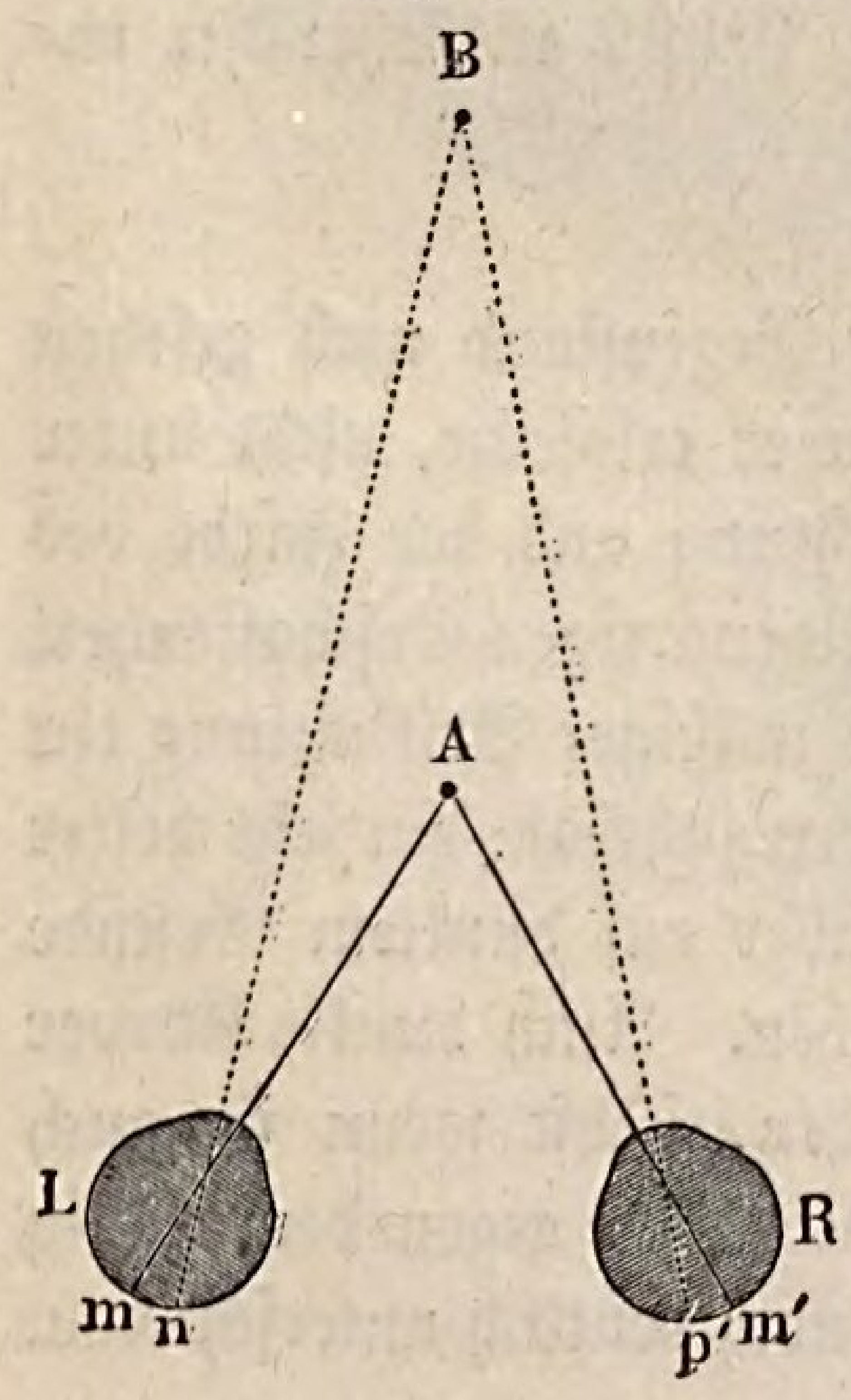


Fig. 331.

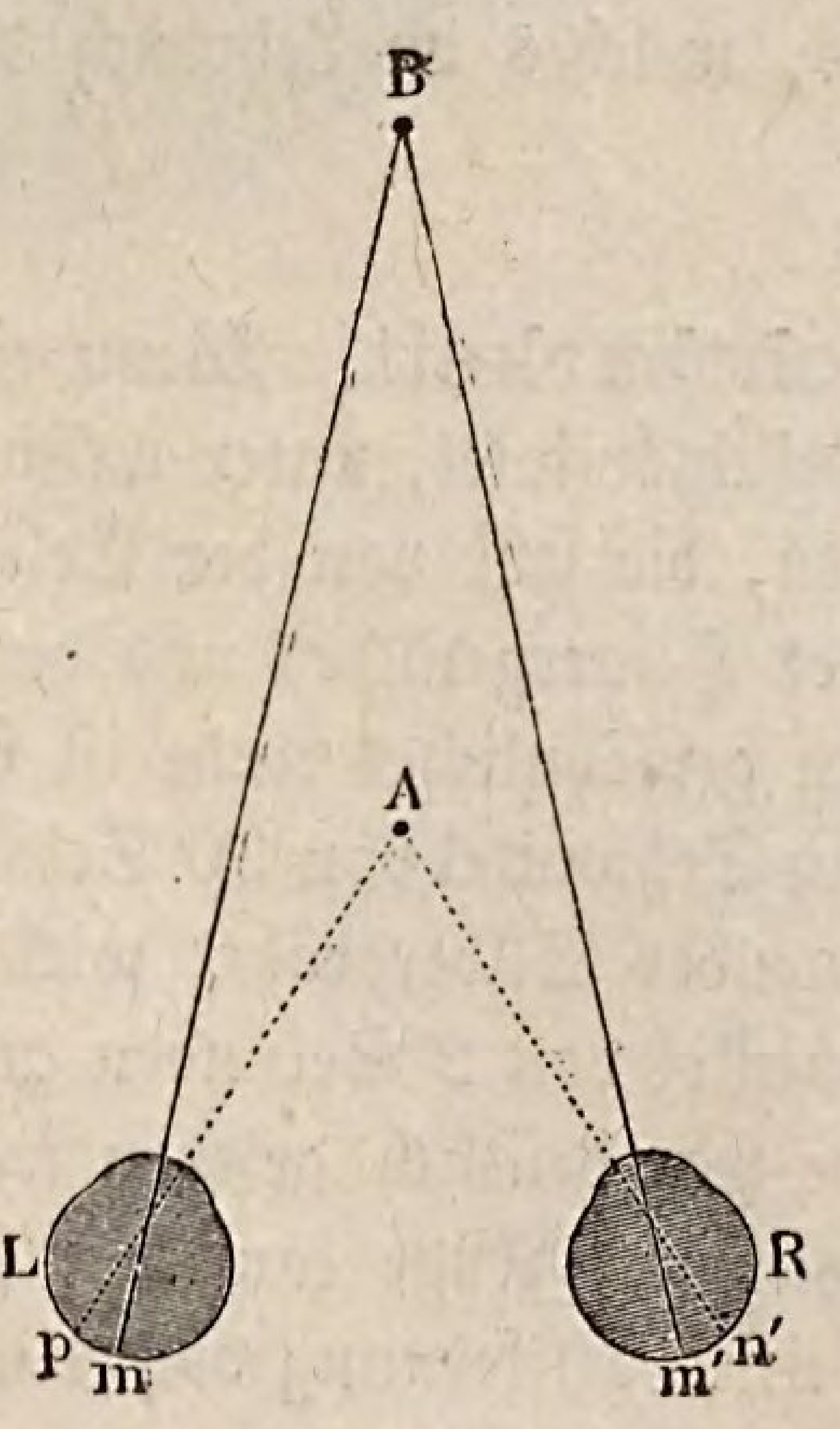
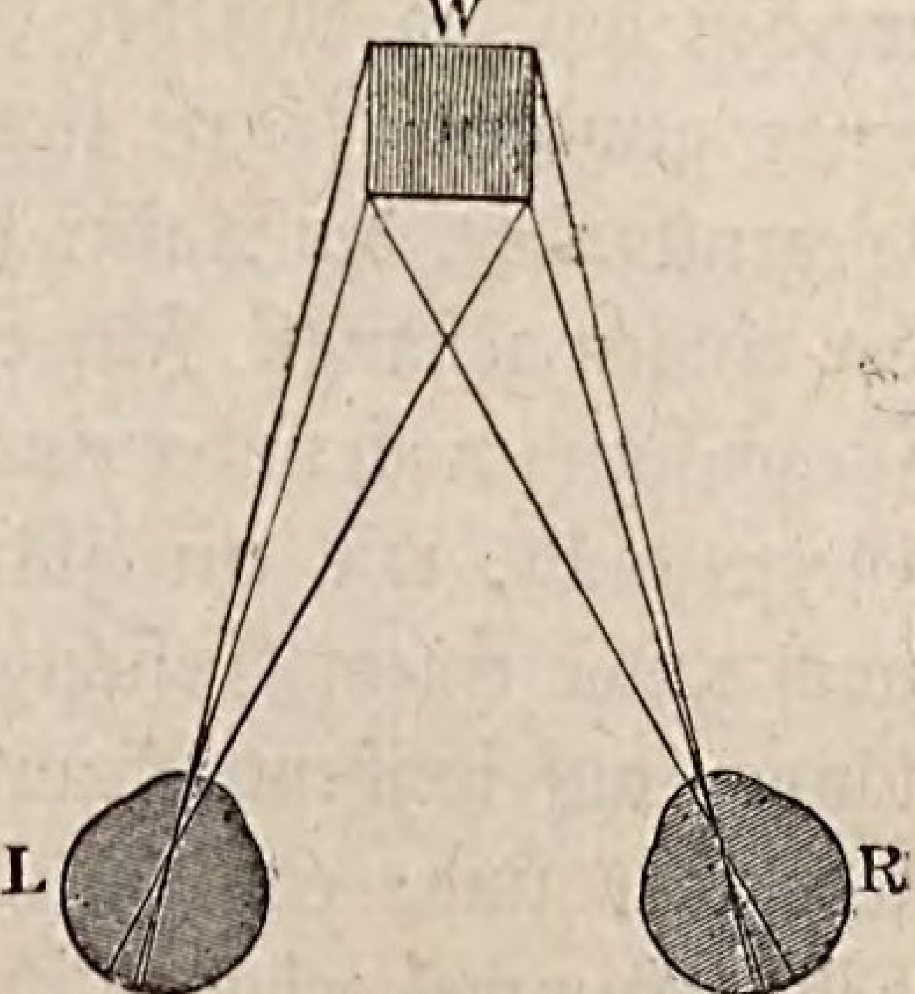


Fig. 332.



gleichweit links von *m* und *m'*, wie z. B. *n* und *n'*, *p* und *p'*, Fig. 329 (a. v. S.). Die Punkte *A*, *B* und *C* werden einfach gesehen, weil ihre Bilder in beiden Augen auf korrespondierende Netzhautpunkte fallen; nämlich das Bild von *A* auf *n* und *n'*, das Bild von *B* auf *m* und *m'*, das Bild von *C* auf *p* und *p'*.

Wenn beide Augenaxen auf den nahen Gegenstand *A*, Fig. 331 (a. v. S.), gerichtet sind, so daß sein Bild auf die entsprechenden Punkte *m* und *m'* fällt, so sieht man ihn einfach, während man den entfernteren Punkt *B* doppelt sieht, weil sein Bild in beiden Augen nicht auf korrespondierende Netzhautpunkte fällt, nämlich rechts von *m* im einen Auge, links von *m* im anderen. Aus dem gleichen Grunde sieht man den nahen Punkt *A* doppelt, wenn beide Augenaxen, wie in Fig. 332 (a. v. S.), auf einen entfernten Gegenstand *B* gerichtet sind.

Das Sehen mit zwei Augen trägt wesentlich zur richtigeren Schätzung der Entfernungen näherer Gegenstände bei.

Wenn man einen etwas näheren Gegenstand, etwa den Würfel *W*, Fig. 332 (a. v. S.), mit beiden Augen betrachtet, so ist die Ansicht desselben für das linke Auge nicht ganz dieselbe, wie für das rechte. Das rechte Auge nämlich sieht die Vorderfläche des Würfels und die rechte Seite desselben, während für das linke Auge gleichfalls die Vorderseite, außerdem aber noch die linke Fläche des Würfels sichtbar ist.

Dieser Umstand aber, daß für nicht zu weit entfernte Objekte die Ansichten beider Augen nicht gleich sind, ist vorzugsweise die Ursache, daß wir die Gegenstände nicht flächenhaft, sondern wahrhaft körperlich, plastisch, sehen.

Es sei von irgend einem Gegenstande eine Zeichnung entworfen, wie sie dem rechten, und eine zweite, wie sie dem linken Auge entspricht; werden nun diese Zeichnungen so vor die Augen gebracht, daß jedes Auge nur die ihm angehörige Zeichnung sehen kann, so müssen sich die Lichteindrücke beider Augen zu einer vollkommen körperlichen Anschauung kombinieren, wenn sie auf entsprechende Stellen der Netzhaut fallen, und darauf beruhen die überraschenden Effekte des Stereoskops, welches im Lehrbuch der Physik ausführlicher besprochen wird.

159 **Grenzen der Sichtbarkeit.** Wenn ein Gegenstand noch gesehen werden soll, so darf der Gesichtswinkel, unter welchem er erscheint, nicht unter einer gewissen Grenze liegen, die sehr von der Erleuchtung und der Farbe des Gegenstandes, der Natur des Hintergrundes und der eigenartigen Beschaffenheit der Augen abhängt. Für ein gewöhnliches Auge ist bei mäßiger Beleuchtung ein Gegenstand noch unter einem Sehwinkel von 30 Sekunden sichtbar; ein sehr heller Gegenstand, wie ein glänzender Silberdraht, wird aber auf dunklem Grunde noch unter einem Gesichtswinkel von 2 Sekunden gesehen. Auch dunkle Körper können auf weißem Grunde sehr deutlich gesehen werden, selbst wenn sie auch sehr fein sind; ein mittelmäßiges Auge kann ein Haupthaar gegen den mäßig hellen Himmel gehalten in einer Entfernung von 1 m noch deutlich unterscheiden.

Dauer des Lichteindruckes. Wenn man mit einer glühenden Kohle rasch einen Kreis beschreibt, so kann man die Kohle selbst nicht unterscheiden, sondern man sieht einen feurigen Kreis. Der Grund dieser Erscheinung liegt darin, daß eine durch einen Lichteindruck erregte Stelle der Netzhaut nicht augenblicklich wieder zur Ruhe kommt, wenn der Lichteindruck selbst aufgehört hat. 160

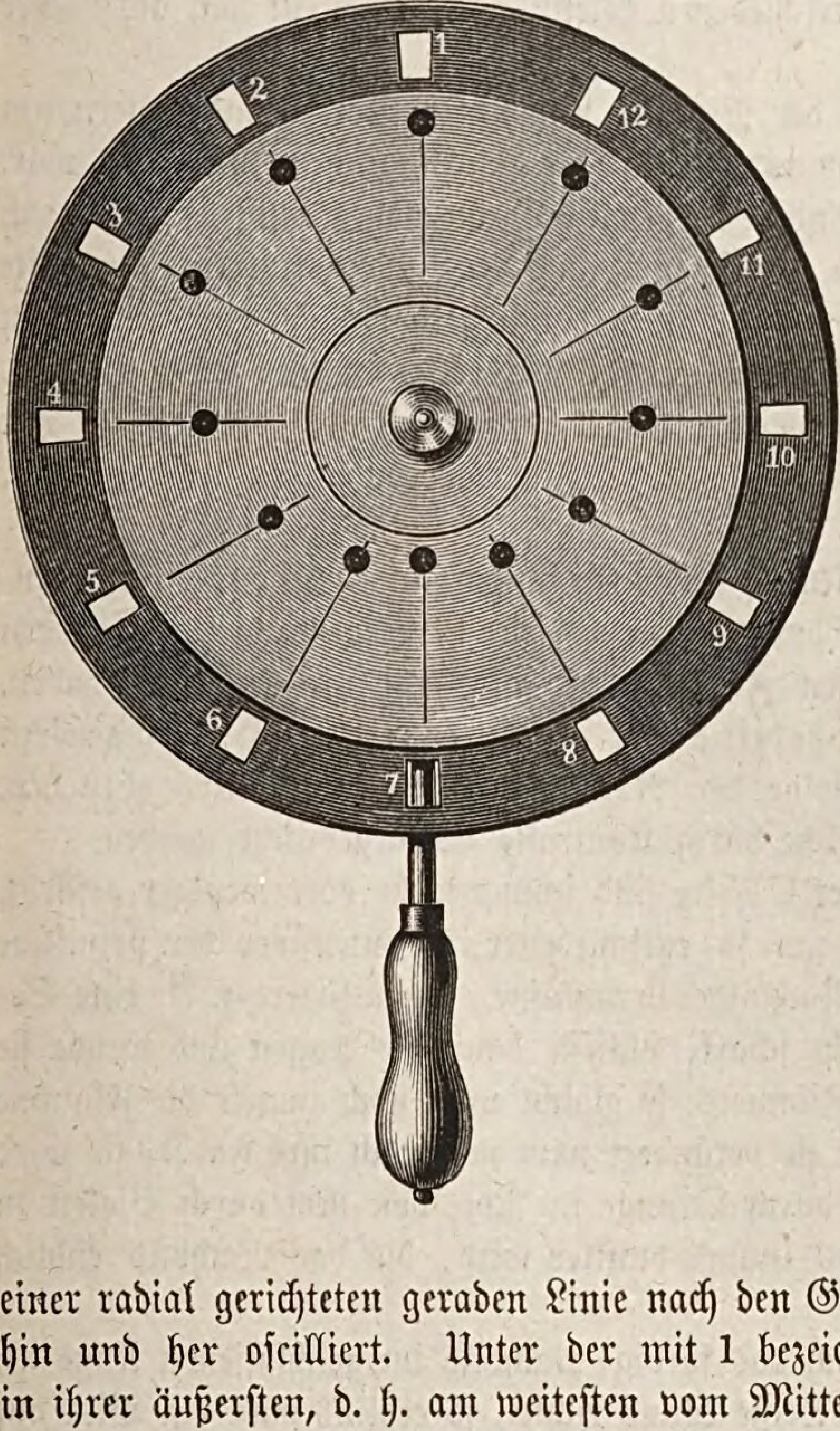
Fig. 333.



Aus demselben Grunde kann man auch die Speichen eines schnell laufenden Rades nicht unterscheiden; ebenso erscheint die obere Fläche eines Kreisels, welcher, wie in Fig. 333, mit abwechselnd weißen und schwarzen Sektoren bemalt ist, bei rascher Rotation gleichförmig grau. Wenn aber der Kreisel im Dunkeln rotiert und momentan erleuchtet wird, etwa durch einen Blitz oder einen elektrischen Funken, so kann man die einzelnen Sektoren deutlich unterscheiden.

Ein recht sinnreicher Apparat, welcher sich auf die Dauer des Lichteindruckes gründet, ist das sogenannte Stroboskop oder Phenakistoskop.

Fig 334.



Eine Scheibe von 20 bis 25 cm Durchmesser kann um eine horizontale Axe in eine rasche Rotationsbewegung versetzt werden; am Rande dieser Scheibe befindet sich eine Reihe von Öffnungen, welche in gleichen Abständen auf einander folgen; in dem Fig. 334 dargestellten Stroboskop befinden sich 12 solcher Öffnungen. Innerhalb des durch die 12 Öffnungen gebildeten Ringes ist nun eine kleinere bemalte Scheibe befestigt, auf welcher ein und derselbe Gegenstand in 12 auf einander folgenden Stellungen abgebildet ist, so daß jeder Öffnung eine andere Stellung entspricht. In unserer Figur ist ein ganz einfacher Gegenstand gewählt, nämlich eine schwarze Kugel, welche auf einer radial gerichteten geraden Linie nach den Gesetzen der Pendelschwingungen hin und her oscilliert. Unter der mit 1 bezeichneten Öffnung ist die Kugel in ihrer äußersten, d. h. am weitesten vom Mittelpunkte der Scheibe entfernten

Stellung dargestellt, unter der Öffnung 2 ist sie schon etwas, unter 3 ist sie noch weiter gegen die Mitte ihrer Bahn vorgerückt, welche sie unter 4 erreicht hat. Bei 7 hat sie ihre innerste Stellung erreicht und beginnt nun nach demselben Gesetz zurückzugehen. Dieser Apparat wird nun so vor einen Spiegel gehalten, daß die bemalte Fläche dem Spiegel zugekehrt ist und man durch eine Öffnung, etwa durch die oberste, das Bild der bemalten Scheibe im Spiegel sieht. Wenn nun die Scheibe rotiert, so geht eine Öffnung nach der anderen vor dem Auge vorüber; während aber die Zwischenräume vor dem Auge hergehen, empfängt das Auge keinen Lichteindruck. Da nun aber der Lichteindruck, welchen das Auge empfängt, während eine Öffnung vor dem Auge vorübergeht, bleibt, bis die nächste Öffnung vor demselben anlangt, so hat man den Eindruck, als ob die Kugel sich von der einen Stellung in die folgende fortbewegt hätte. Die auf diese Weise der Reihe nach dem Auge vorgeführten Stellungen der schwarzen Kugel machen dann den täuschenden Eindruck, als ob sie in gerader Linie auf und ab oscilliere. Statt der oscillierenden Kugel kann man auch andere Gegenstände, z. B. Menschen und Tiergestalten, wählen, die man der Reihe nach in ebenso vielen verschiedenen Stellungen dargestellt hat, als Löcher vorhanden sind.

Die Nachwirkungen auf der Netzhaut sind um so stärker und dauern um so länger fort, je intensiver und andauernder die ursprüngliche Einwirkung war.

Ebenso wie die Gegenstände eine gewisse Größe haben müssen, um durch das Auge wahrnehmbar zu sein, ebenso muß auch der Lichteindruck eine namhafte Zeit andauern, um eine Wirkung auf die Netzhaut hervorzubringen; aus diesem Grunde wird ein sehr schnell sich bewegender Körper, z. B. eine Kanonenkugel, nicht gesehen, das Bild der fliegenden Kugel bewegt sich auf der Netzhaut mit solcher Geschwindigkeit, daß es an keiner Stelle wahrgenommen werden kann.

161 **Farbige Nachbilder.** Unser Gesichtsorgan empfindet oft Farbeneindrücke, die nicht unmittelbar durch äußere Objekte hervorgebracht sind, sondern in einem eigentümlich gereizten Zustande der Netzhaut ihren Grund haben. Man nennt solche Farben subjektive oder physiologische. Hierher gehören die Nachbilder, welche infolge der Nachwirkung des Lichtreizes entstehen, sowie die Nebenbilder, welche durch Kontraste hervorgebracht werden.

Die Nachbilder sehr heller Objekte sind immer mehr oder weniger gefärbt, und zwar ist diese Färbung um so entschiedener, je intensiver der primitive Lichteindruck war, welcher die Nachbilder veranlaßte. Man fixiere z. B. eine Sekunde lang ein Kerzenlicht recht scharf, schließe dann die Augen und wende sie nach einer dunklen Stelle des Zimmers, so glaubt man noch immer die Flamme vor den Augen zu haben, aber sie verändert nach und nach ihre Farbe; sie wird alsbald ganz gelb, geht dann durch Orange in Rot, von Rot durch Violett in grünliches Blau über, welches immer dunkler wird, bis das Nachbild endlich ganz verschwindet.

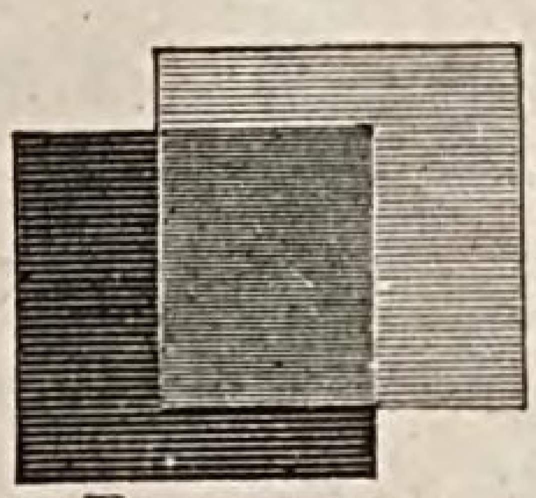
Wenn man, während noch das farbige Nachbild im geschlossenen Auge ist, das Auge öffnet und auf eine weiße Wand richtet, so erblickt man ein Bild auf

dieser Wand, welches demjenigen komplementär ist, welches man zu derselben Zeit bei geschlossenem Auge wahrnehmen würde. Ist das Nachbild im geschlossenen Auge rot geworden, so erblickt man ein grünes Bild, wenn man das Auge öffnet und auf eine weiße Fläche richtet.

Wenn man längere Zeit einen farbigen Fleck auf weißem Grunde scharf fixiert und dann das Auge seitwärts auf die weiße Fläche richtet, so sieht man ein komplementär gefärbtes Nachbild; war der Fleck blau, so ist das Nachbild gelb; war er rot, so ist es grün u. s. w. Diese Erscheinung erklärt man durch die Annahme, daß die Netzhaut für die Farbe des Objektes abgestumpft und also für diejenigen im weißen Lichte enthaltenen Farben empfindlicher wird, die nicht in der Farbe des die Blendung veranlassenden Objektes enthalten sind.

Daß die Netzhaut durch das längere Betrachten eines stark erleuchteten farbigen Gegenstandes allmählich für diese Farbe abgestumpft wird, geht auch daraus hervor, daß letztere nach und nach immer matter und unscheinbarer wird. Man kann sich davon am leichtesten auf folgende Weise überzeugen. Man fixiere längere Zeit ein farbiges, etwa ein rotes Quadrat, welches sich auf einem weißen Grunde befindet, und wende dann das Auge nur etwas seitwärts, so daß das komplementäre Nachbild zum Teil noch auf das farbige Quadrat fällt, wie dies in Fig. 335 angedeutet ist. Der freie Teil des Nachbildes erscheint jetzt grün, der frei gewordene Teil des Objektes, d. h. derjenige Teil, welcher seine Strahlen jetzt auf Stellen der Netzhaut sendet, die vorher noch nicht von dem roten Lichte getroffen waren, erscheint lebhaft rot; da aber, wo beide Quadrate über einander fallen, sieht man ein weit matteres Rot, denn die von diesem Teile des objektiven roten Quadrates ausgehenden Strahlen treffen noch immer solche Stellen der Netzhaut, welche gegen den Eindruck des roten Lichtes schon mehr abgestumpft sind.

Fig. 335.



Farbige Nebenbilder. Ein grauer Fleck erscheint auf einer weißen Fläche dunkler, auf einer schwarzen heller, als wenn die ganze Fläche mit demselben grauen Tone überzogen wäre. Ein Versuch, welcher dies recht deutlich zeigt, ist folgender: Man bringe einen schmalen undurchsichtigen Körper, etwa einen Bleistift, zwischen eine Kerzenflamme und eine weiße Fläche, und man wird einen dunklen Schatten auf hellem Grunde sehen; bringt man nun eine zweite Kerzenflamme neben die erstere, so sieht man zwei dunkle Schatten auf dem hellen Grunde; jeder dieser Schatten ist aber jetzt durch eine Kerze ebenso stark erleuchtet, als es vorher die ganze Fläche war, und doch hielt man vorher die Fläche für hell und jetzt hält man den Schatten für dunkel; dieser Versuch beweist den bedeutenden Einfluß des Kontrastes. 162

Noch auffallender sind die Kontrasterscheinungen bei Betrachtungen farbiger Gegenstände, wobei man oft *komplementäre Farben* sieht, welche objektiv gar nicht vorhanden sind.

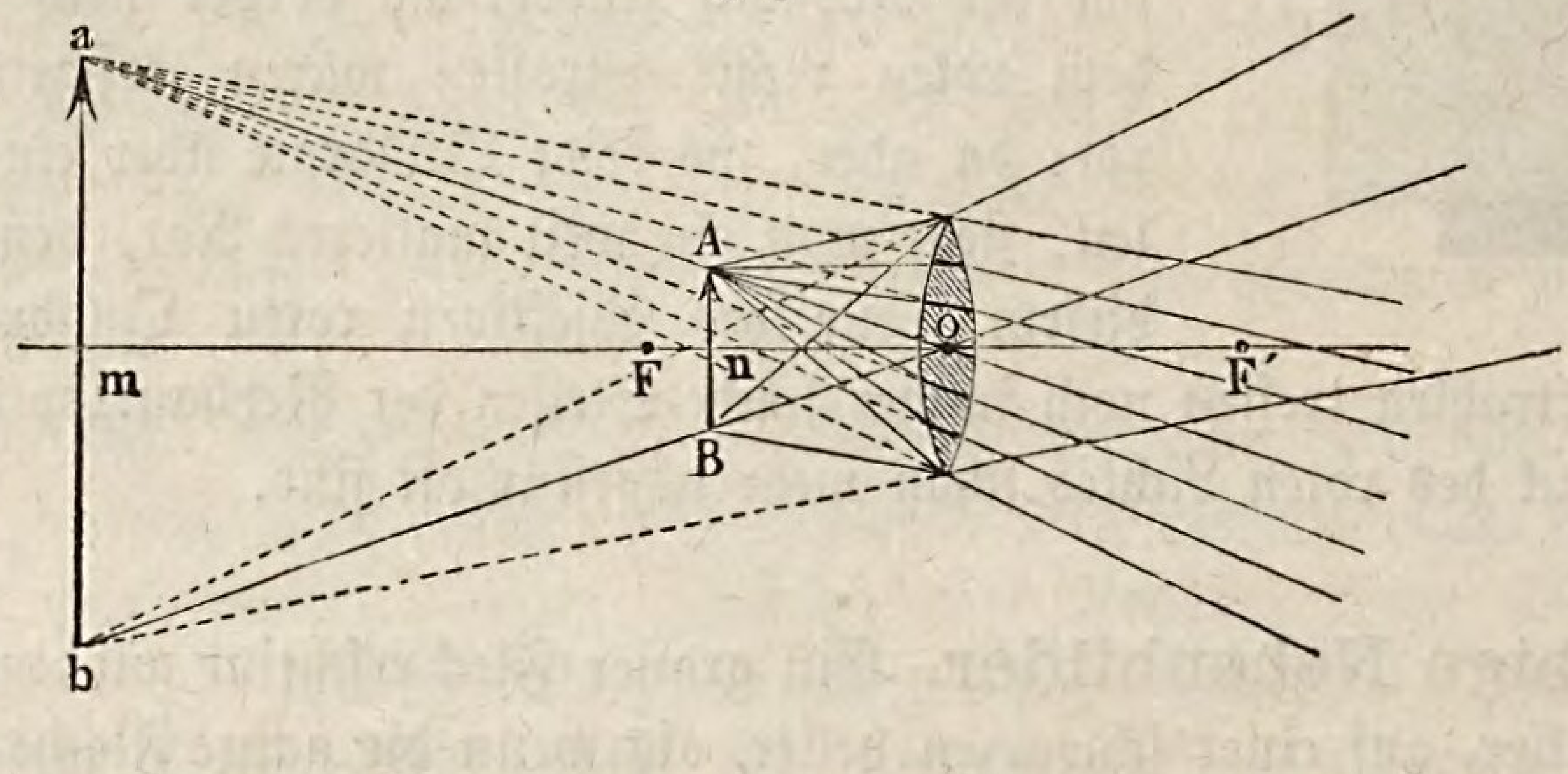
Legt man einen schmalen grauen Papierschnitzel auf ein lichtgrünes Papier, so erscheint der Streifen rötlich; legt man ihn auf ein blaues Papier, so erscheint er gelb; kurz, er erscheint immer komplementär zur Farbe des Grundes. Sehr deutlich nimmt man die Erscheinung wahr, wenn man einen ungefähr 1 mm breiten Streifen von weißem Papier auf eine Tafel von farbigem Glase klebt und dann durch dasselbe nach einer weißen Fläche, etwa nach einem Blatte weißen Papiers, sieht; der Streifen erscheint dann komplementär zur Farbe des Glases, also rot auf einem grünen Glase, blau auf einem gelben u. s. w.

Was die Erklärung der farbigen Nebenbilder betrifft, so ist sie wohl darin zu suchen, daß, wenn irgend ein Teil der Netzhaut durch farbiges Licht erregt wird, diese direkte Wirkung auch auf die benachbarten Stellen der Netzhaut in der Weise reagiert, daß sie in einen dem anfänglichen Eindrucke komplementären Zustand versetzt werden.

Jede Zusammenstellung von Farben, welche komplementär zu einander sind, macht einen angenehmen Eindruck auf das Auge, jede derselben erscheint durch die andere gehoben und feuriger als für sich allein. Dagegen kann die schönste Farbe durch unpassende Zusammenstellung unscheinbar gemacht werden.

163 **Die Loupe oder das einfache Mikroskop.** Wir haben oben gesehen, daß die scheinbare Größe eines Gegenstandes von der Größe des Sehwinkels abhängt, unter welchem er erscheint; der Sehwinkel wird aber um so

Fig. 336.



größer, je mehr der Gegenstand dem Auge genähert wird. Nun aber können wir einen Gegenstand nur bis zu einer gewissen Grenze, der Weite des deutlichen Sehens, dem unbewaffneten Auge nähern, wenn noch eine scharfe Unterscheidung der Umrisse und der einzelnen Teile möglich sein soll, und dadurch ist auch einer weitern Vergrößerung des Sehwinkels eine Grenze gesetzt. Ein jedes Instrument, welches eine weitere Vergrößerung für den Sehwinkel kleiner naher Gegenstände möglich macht, als bei unbewaffnetem Auge möglich ist, wird ein *Mikroskop* genannt. Nach dieser Erklärung ist auch die kleine Öffnung im Kartenblatte, welche in §. 156 besprochen wurde, ein Mikroskop und zwar ein einfaches; doch bezeichnet man mit dem Namen des *einfachen Mikroskopes* in der Regel nur Konvexlinsen von geringer Brennweite.

Um zu begreifen, wie eine einfache Sammellinse als Mikroskop dienen kann,

braucht man nur einen Blick auf Fig. 336 zu werfen. Es sei AB ein Gegenstand, der sich innerhalb der Brennweite der Linse befindet, dann divergieren alle von einem Punkte des Gegenstandes AB ausgehenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse gerade so, als ob sie von dem entsprechenden Punkte des Bildes ab herkämen, wie dies schon oben gezeigt wurde. Nun wird ein hinter der Linse befindliches Auge den Gegenstand durch die Linse deutlich sehen können, wenn sich das Bild ab in der Weite des deutlichen Sehens befindet; in diesem Falle aber liegt der Gegenstand selbst dem Auge weit näher, so daß man ihn ohne die Linse nicht mehr deutlich sehen könnte. Die vergrößernde Kraft der Linse ist also im wesentlichen darin zu suchen, daß sie es möglich macht, den Gegenstand dem Auge sehr nahe zu bringen, wodurch denn natürlich auch der Sehwinkel vergrößert wird.

Um die durch die Loupe hervorgebrachte Vergrößerung zu bestimmen, müssen wir die Größe des Sehwinkels, unter welchem das Bild ab dem Auge erscheint, wenn es sich in der Entfernung des deutlichen Sehens befindet, mit der Größe des Sehwinkels vergleichen, unter welchem der Gegenstand selbst erscheinen würde, wenn er ebenso weit vom Auge entfernt wäre.

Genau läßt sich der Winkel, unter welchem das Bild ab erscheint, nur dann ermitteln, wenn die Entfernung des Glases vom Kreuzungspunkte im Auge bekannt ist; da man aber das Auge dicht hinter die Linse hält und die Dicke derselben selbst unbedeutend ist, so kann man ohne großen Fehler den Kreuzungspunkt als mit dem Mittelpunkte o der Linse zusammenfallend annehmen; unter dieser Voraussetzung ist nun die Vergrößerung leicht zu berechnen.

Von o aus gesehen erscheint der Gegenstand AB und das Bild ab unter gleichem Gesichtswinkel; wir finden also die Vergrößerung, wenn wir den Gesichtswinkel, unter welchem AB erscheint, mit demjenigen vergleichen, unter welchem derselbe Gegenstand erscheinen würde, wenn er bis in die Weite des deutlichen Sehens von o entfernt, wenn er also an die Stelle des Bildes ab gesetzt wäre. Da die scheinbare Größe eines Gegenstandes seiner Entfernung vom Auge umgekehrt proportional ist, so verhalten sich der Gesichtswinkel AoB und der Winkel, unter welchem AB von o aus betrachtet erscheinen würde, wenn dieser Gegenstand bis ab fortgerückt wäre, umgekehrt wie die Entfernungen des Gegenstandes AB und des Bildes ab von o. Bezeichnen wir die Entfernung des Bildes ab von o mit d, die Entfernung des Gegenstandes AB von o mit x, so ist die Vergrößerung $\frac{d}{x}$, wo d auch gleich der Weite des deutlichen Sehens ist.

Nehmen wir an, das Bild befinde sich in der Weite des deutlichen Sehens, der Gegenstand aber wäre im Brennpunkte der Linse, so wäre die Vergrößerung $\frac{d}{f}$, wenn f die Brennweite der Linse darstellt. Dieser Ausdruck $\frac{d}{f}$ giebt uns nun freilich nicht den genauen Wert der Vergrößerung an, er macht aber ein annähernd richtiges Urteil über die Vergrößerung der Loupe möglich.

Wenn das Bild ab in der Entfernung d entstehen soll, so muß sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite befinden, x ist also jedenfalls kleiner

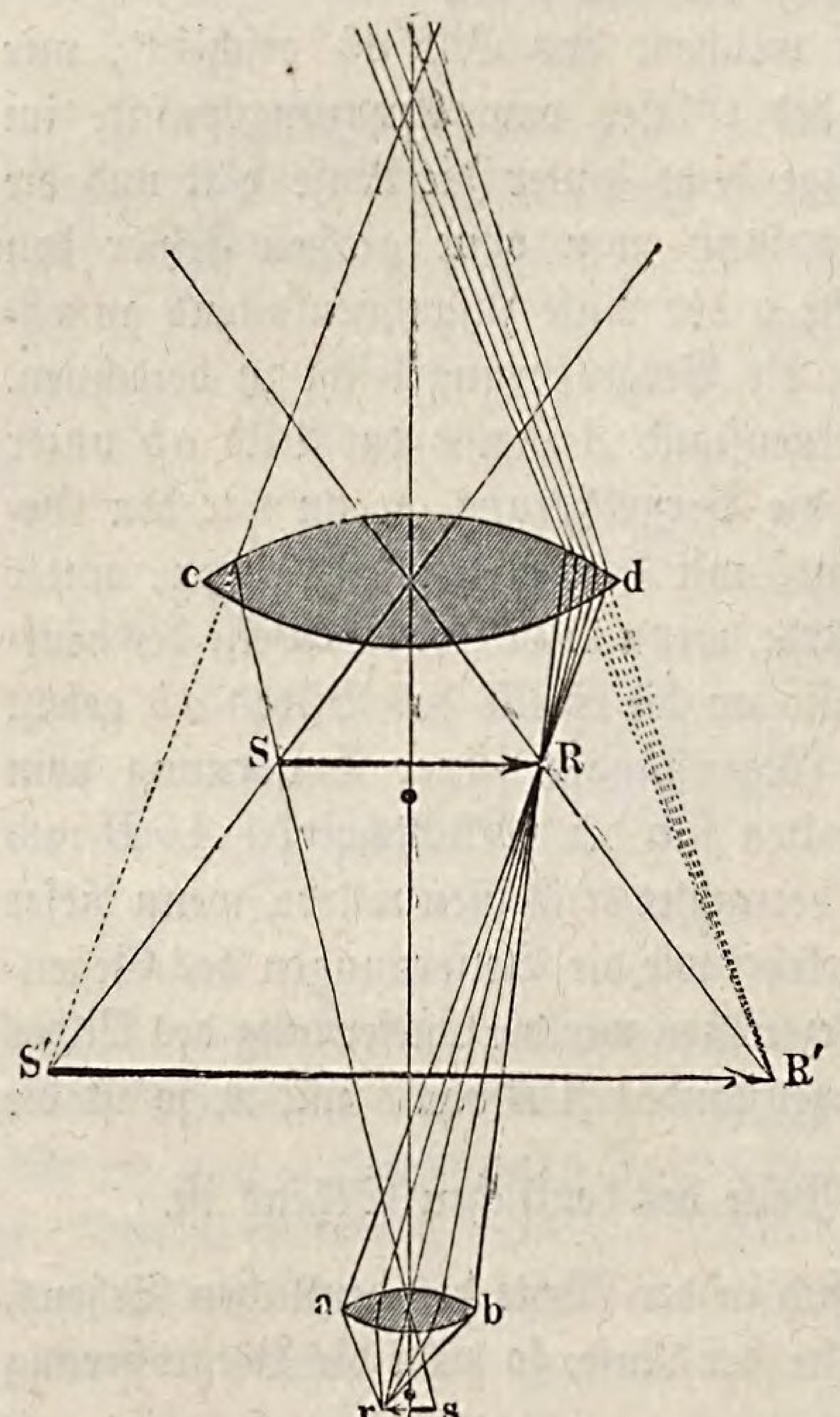
als f, der wahre Wert der Vergrößerung ist also jedenfalls noch etwas größer als $\frac{d}{f}$.

Wenn z. B. die Weite des deutlichen Sehens 30 cm, die Brennweite der Linse 6 cm ist, so wird die Vergrößerung noch etwas mehr als $\frac{30}{6}$, d. h. noch etwas mehr als 5 betragen.

Je kleiner der Wert von f wird, d. h. je geringer die Brennweite der Linse ist, desto kleiner wird auch der Wert von x, desto größer der Wert von $\frac{d}{x}$, desto stärker ist also die Vergrößerung. Eine Loupe von kurzer Brennweite vergrößert also stärker als eine solche von größerer Brennweite.

164 **Das zusammengesetzte Mikroskop.** Die Principien, auf welchen die Konstruktion aller, wenn auch in ihrer sonstigen Einrichtung noch so sehr von einander abweichenden Mikroskope beruht, sind folgende:

Fig. 337.



1. Die Gegenstände, welche man dem Versuche unterwerfen will, befinden sich nahe bei einer Sammellinse ab von kurzer Brennweite (Fig. 337), und zwar etwas jenseits des Brennpunktes. Diese Linse, sie mag nun einfach oder zusammengesetzt sein, wird die Objektivlinse oder das Objektiv des Mikroskopes genannt.

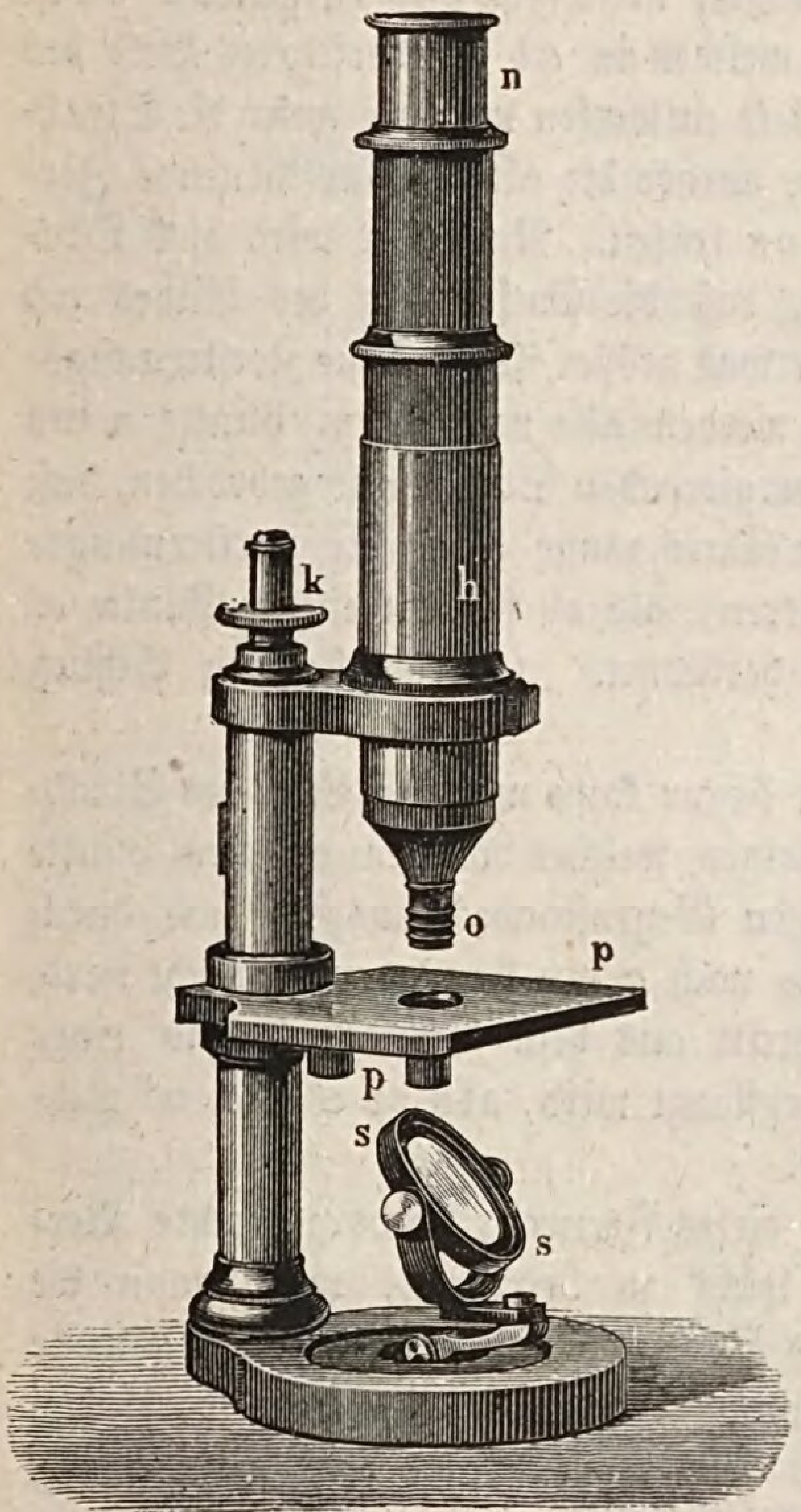
2. Durch das Objektiv ab wird von dem kleinen Gegenstande rs ein verkehrtes vergrößertes Bild RS entworfen; dieses Bild wird durch eine zweite Linse dc betrachtet, welche das Augenglas oder das Okular heißt und hier als Loupe dient, so daß der Beobachter statt des reellen Bildes RS das virtuelle Bild $R'S'$ sieht.

Die von r ausgehenden Strahlen divergieren also nach ihrem Durchgange durch das Instrument so, als ob sie von R', die von s ausgehenden so, als ob sie von S' herkämen.

So besteht denn jedes zusammengesetzte Mikroskop im wesentlichen aus einem Objektive und einem Okulare; die Vergrößerung des Mikroskopes ist aber gleich dem Produkt der Vergrößerungen, welche jedes dieser Gläser hervorbringt. Wenn z. B. das Objektiv im Durchmesser 5 mal, das Okular aber

10 mal vergrößerte, so würde ein solches Mikroskop den Durchmesser der Gegenstände 50 mal, die Oberfläche also 2500 mal vergrößern.

Fig. 338.



Um reine und scharfe Bilder zu erhalten, muß die Objektivlinse des Mikroskopes eine achromatische sein; für etwas stärkere Vergrößerungen aber ist das Objektiv durch eine Kombination mehrerer schwächeren achromatischen Linsen gebildet, welche wie eine einzige stärkere Linse wirken, aber ein von den Fehlern der sphärischen Aberration (§. 137, S. 272) freieres Bild geben.

Auch das Okular des Mikroskops besteht in der Regel aus einer Kombination von zwei Linsen.

Fig. 338 erläutert die äußere Einrichtung des Mikroskopes; das Objektiv *o* ist an das untere Ende einer Messingröhre angeschraubt, in welche oben bei *n* ein kurzes, das Okular enthaltendes Rohr eingeschoben wird. Das Objekt wird auf den Tisch *p* gelegt und durch den Spiegel *s* von unten erleuchtet.

Um das Objektiv *o* in solche Entfernung vom Objekte bringen zu können, daß man ein deutliches Bild desselben sieht, ist die Mikroskopröhre in der Messinghülse *h* sanft verschiebbar; die feinere Einstellung geschieht mittels des Schraubenkopfes bei *k*.

Das Mikroskop hat nicht nur zu den bedeutendsten wissenschaftlichen Entdeckungen geführt, sondern es ist auch für das praktische Leben wichtig geworden, indem es in vielen Fällen das zweckmäßigste Mittel bietet, um Verfälschungen von Nahrungsmitteln nachzuweisen, Wollen-, Leinen- und Baumwollfasern zu unterscheiden u. s. w.

Dioptrische Fernröhre. Auch die Fernröhre, deren Zweck es 165
ist, entfernte Gegenstände vergrößert zu zeigen, bestehen nur aus einem dem Gegenstande zugekehrten Objektiv, d. h. einer Linse von großem Durchmesser und großer Brennweite, welche wo möglich achromatisch sein soll, und einem Okular, durch welches der Beobachter hindurchschaut. Die verschiedenen Arten der dioptrischen Fernröhre unterscheiden sich nur durch die verschiedene Einrichtung des Okulars. Bei dem holländischen oder Galiläi'schen Fernrohre besteht das Okular aus einer Zerstreuungslinse; das

Okular des astronomischen oder Kepler'schen Fernrohres hat eine oder zwei Sammellinsen, das Okular des Erdfernrohres endlich hat deren vier.

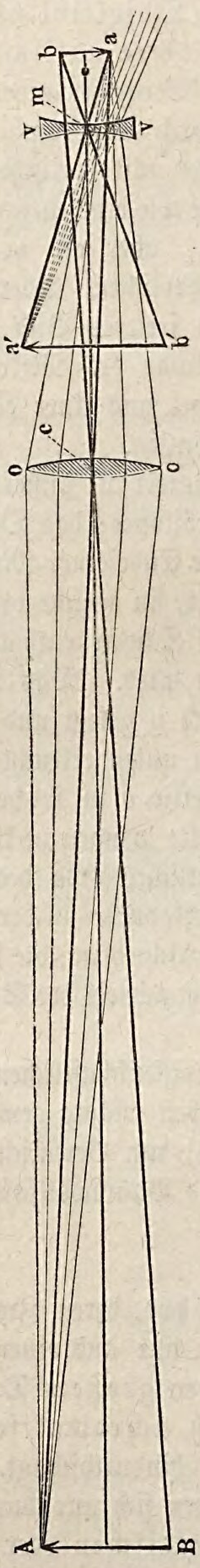


Fig. 339.

Die Einrichtung des holländischen oder Galiläi'schen Fernrohres ist in Fig. 339 dargestellt. oo ist das Objektiv, welches in ab ein verkehrtes Bild des Gegenstandes AB entwerfen würde, wenn die Strahlen nicht schon vorher die als Okular dienende Zerstreuungslinse vv träfen. Nun aber wird dies Okular so gestellt, daß die Entfernung des Bildes ab von demselben etwas größer ist als seine Zerstreuungsweite, folglich werden alle nach einem Punkte a des Bildes ab konvergierenden Strahlen so gebrochen, daß sie nach ihrem Durchgange durch die Zerstreuungslinse so divergieren, als ob sie von einem Punkte a' vor derselben herkämen. (Vergleiche den Schluß des §. 139.)

In unserer Figur kann man den Lauf des Strahlenbündels verfolgen, welches von dem obersten Punkte A des entfernten Gegenstandes ausgeht und durch das Objektiv oo nach a hin konvergent gemacht wird, nach dem Austritt aus dem Okular aber in einer Richtung fortgepflanzt wird, als ob es von a' ausgegangen wäre.

Die durch dieses Fernrohr hervorgebrachte Vergrößerung ist leicht zu berechnen, wenn man die Brennweite des Objektivs und die Zerstreuungsweite des Okulars kennt. Der Winkel AcB, unter welchem der Gegenstand dem bloßen Auge erscheinen würde, ist gleich dem Winkel bca; denken wir uns nun das Auge in den Mittelpunkt m des Okulars versetzt, so erscheint, durch das Fernrohr gesehen, der Gegenstand unter dem Winkel $a'mb'$, welcher dem Winkel bma gleich ist. Um zu bestimmen, wie vielmal das Fernrohr vergrößert, haben wir also nur zu ermitteln, wie vielmal der Winkel bma größer ist als der Winkel bca.

Die Entfernung des Bildes ab vom Objektiv ist gleich der Brennweite f desselben, wenn der Gegenstand sehr weit entfernt ist; die Entfernung des Bildes ab vom Okular ist aber nur unmerklich größer als die Zerstreuungsweite f' dieses Glases, und wir können sie ohne merklichen Fehler gleich f' setzen. Nun aber verhalten sich die Winkel bma und bca sehr nahe umgekehrt wie diese Entfernungen, also:

$$bma : bca = bc : bm = f : f',$$

oder, da $bma : bca$ die Vergrößerung angiebt,

$$\frac{bma}{bca} = \frac{f}{f'}.$$

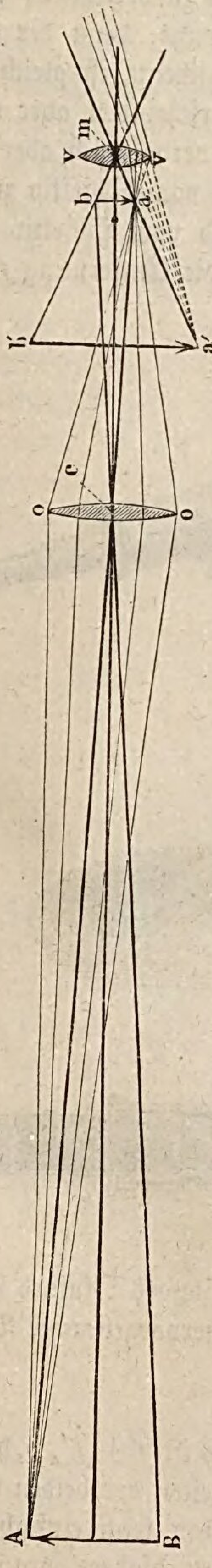


Fig. 341.

Man findet also die Vergrößerung, wenn man die Brennweite des Objektivs durch die Zerstreuungsweite des Okulars dividiert; die Vergrößerung ist demnach um so bedeutender, je größer die Brennweite des Objektivs und je kleiner die Zerstreuungsweite des Okulars ist.

Die Entfernung der beiden Gläser ist offenbar sehr nahe gleich $f - f'$; wenn man also verschiedene Okulare mit demselben Objektiv verbindet, so wird die Entfernung der beiden Gläser um so größer sein müssen, je kürzer die Zerstreuungsweite des Okulars, je stärker also die Vergrößerung ist.

Fig. 340.

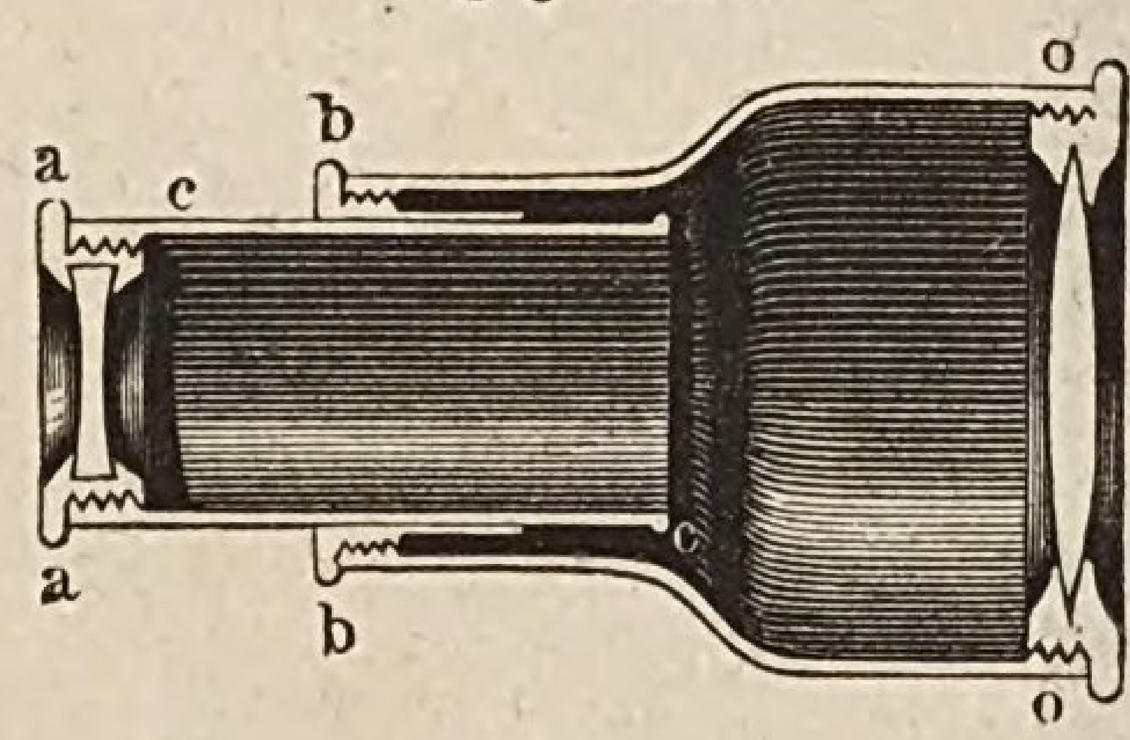


Fig. 340 erläutert die gewöhnlichste Form der holländischen Fernröhre, nämlich das Theaterperspektiv. Die Röhre c, welche das Okular enthält, kann nach Belieben ausgezogen und eingeschoben werden, bis man ein scharfes Bild der zu betrachtenden Gegenstände sieht. Je mehr man sich dem Gegenstande nähert, desto mehr muß die Okularröhre ausgezogen werden.

Die Konstruktion der holländischen Fernröhre wird nur zu schwachen Vergrößerungen angewendet, weil sie bei etwas starker Vergrößerung schon ein sehr kleines Gesichtsfeld giebt.

Bei dem Kepler'schen Fernrohre kommt das Bild des Objektivs wirklich zu Stande, und es wird durch eine einfache oder zusammengesetzte Loupe betrachtet, wie man es in Fig. 341 sieht; ab ist das durch das Objektiv oo entworfene verkehrte Bild des Gegenstandes AB, welches, durch die Loupe vv betrachtet, in $a'b'$ vergrößert erscheint. Unsere Figur

zeigt den Lauf des von der Spitze A des Gegenstandes ausgehenden Strahlenbündels, welches durch das Instrument hindurchgeht.

Die Vergrößerung eines solchen Fernrohres ist leicht zu berechnen, wenn man die Brennweite des Objektivs und die des Okulars kennt; denn der Sehwinkel, unter welchem der Gegenstand dem bloßen Auge erscheint, ist gleich dem Winkel AcB, also auch gleich acb; durch das Fernrohr erscheint er aber unter dem Winkel $a'mb'$, welcher gleich amb ist; Winkel amb verhält sich aber zum Winkel acb umgekehrt wie die Entfernung des Bildes ab vom Objektiv zu der Entfernung desselben vom Okular; ferner steht das Bild vom Objektiv nahe um die Brennweite f desselben, vom Okular aber um die Entfernnng f' ab,

Fig. 342.

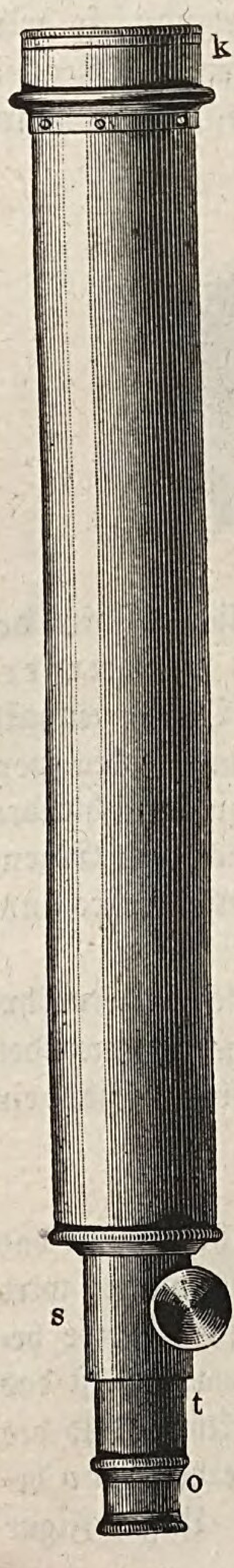


Fig. 343.

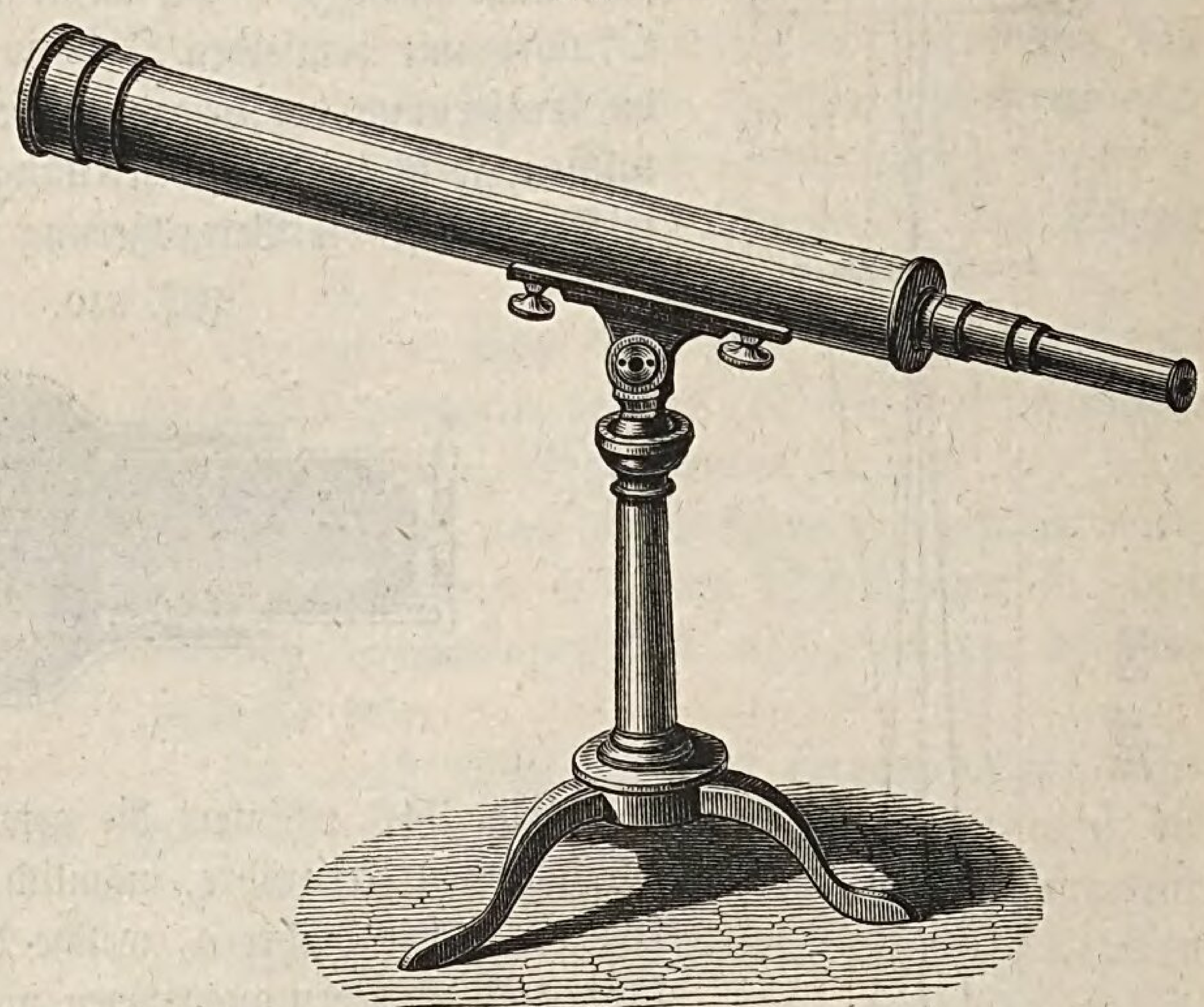
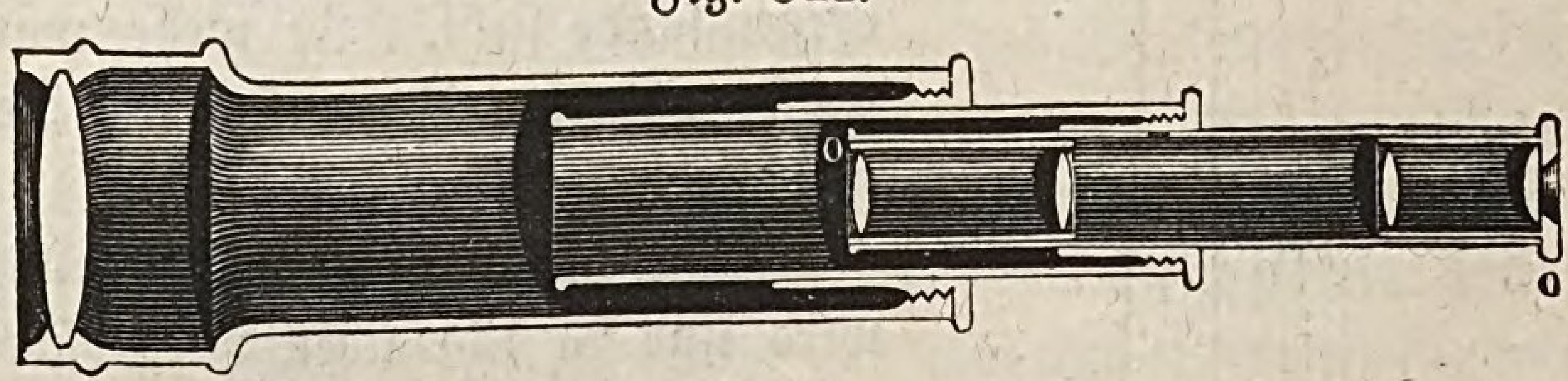


Fig. 344.



wenn wir mit f' die Brennweite des Okulars bezeichnen; die durch das Fernrohr hervorgebrachte Vergrößerung ist also $\frac{f}{f'}$.

Die Länge des Fernrohres ist $f + f'$, d. h. sie ist gleich der Summe der Brennweiten der beiden Gläser.

In der Regel wendet man keine einfache Linse als Okular an, wie wir dies bisher vorausgesetzt haben, sondern eine Kombination von zwei Linsen.

Daß man durch ein astronomisches Fernrohr die Gegenstände verkehrt sieht, ist klar; denn durch das Objektiv wird ein verkehrtes Bild des entfernten Gegenstandes entworfen, und dieses Bild wird dadurch, daß man es durch eine Loupe betrachtet, nicht umgekehrt.

Die Helligkeit des Bildes hängt von der Größe des Objektivs, die Größe des Gesichtsfeldes aber von der Größe des Okulars ab.

Wenn das astronomische Fernrohr zu Messungen dienen soll, so wird es mit einem aus feinen Spinnenfäden hergestellten Fadenkreuze versehen, welches sich genau an der Stelle befindet, an der das Bild des zu betrachtenden Gegenstandes durch das Objektiv entworfen wird.

Fig. 342 erläutert die äußere Einrichtung des astronomischen Fernrohres. An dem vorderen Ende k eines Rohres von entsprechender Länge ist das Objektiv eingeschraubt. Hinten ist dieses Rohr mit einem engeren Ansatze versehen, in welchem die das Okular o tragende Röhre t ausgezogen und eingeschoben werden kann, was in der Regel mittels einen Triebes r geschieht. Solche Fernröhre sind, wenn sie nicht an Meßinstrumenten angebracht werden, meist von etwas größeren Dimensionen und auf besonderen Stativen aufgestellt (Standfernröhre), wie Fig. 343 erläutert.

Beim Betrachten irdischer Gegenstände ist es unangenehm, Alles verkehrt zu sehen, was bei astronomischen Beobachtungen, sowie auch bei Vermessungen gleichgültig ist. Um nun die Gegenstände aufrecht sehen zu können, hat man das Okular des astronomischen Fernrohres durch eine Röhre ersetzt, welche in der Regel vier Konvexlinsen enthält. Diese vier Linsen in der Okularröhre bilden gewissermaßen ein nicht gar stark vergrößerndes zusammengesetztes Mikroskop, durch welches man das verkehrte Bild wieder umgekehrt, also in aufrechter Stellung sieht. Auf diese Art erhält man das Erd- oder terrestrische Fernrohr.

Fig. 344 erläutert die gewöhnliche Einrichtung des terrestrischen Fernrohres. oo ist die mit vier Linsen versehene Okularröhre. Da die terrestrischen Fernröhre häufiger von einem Orte zum anderen getragen und auf Reisen mitgenommen werden, so werden sie in der Regel aus mehreren in einander schiebbaren Röhren zusammengesetzt, die man, um das Instrument kurz zu machen, zusammenschiebt, wenn man es nicht gebraucht, die man aber bis zur gehörigen Länge auszieht, wenn man durch das Fernrohr beobachten will.

Die Vergrößerung des Galiläi'schen und des Kepler'schen Fernrohres läßt sich, wie wir gesehen haben, aus der Brennweite der Gläser leicht berechnen; da aber diese Brennweiten selbst erst durch einen Versuch ermittelt werden müssen, so ist es vorzuziehen, die Vergrößerung der Fernröhre unmittelbar durch den Versuch zu bestimmen. Ganz einfach geschieht dies bei nicht zu starker Vergrößerung auf folgende Weise: Man stellt in einiger Entfernung vom Fernrohre einen geteilten Stab, etwa eine Latte, wie man sie zum Feldmessen braucht, auf und betrachtet denselben gleichzeitig mit dem einen Auge direkt, mit dem andern durch das Fernrohr; dabei beobachtet man, wie viel Abteilungen des mit bloßem Auge gesehenen Maßstabes auf eine durch das Fernrohr

vergrößerte Abteilung fallen, und erhält so unmittelbar den Wert der Vergrößerung. Man kann bei dem eben angegebenen Verfahren auch die Ziegelreihen eines Daches zum Objekt nehmen.

166 **Spiegelteleskope.** Bevor man achromatische Objektivlinsen herstellen konnte, war der Umstand, daß der Brennpunkt einer einfachen Linse nicht für alle farbigen Strahlen derselbe ist, der Reinheit und Schärfe der Bilder sehr nachteilig. Man suchte diesen Übelstand dadurch zu vermeiden, daß man das erste Bild der entfernten Gegenstände nicht durch Linsen, sondern durch metallene Hohlspiegel erzeugte, und so entstanden die Spiegelteleskope.

Fig. 345 stellt ein Newton'sches Spiegelteleskop dar. Der Hohlspiegel *ss* würde von dem entfernten Gegenstande ein Bild in *a* entwerfen;

Fig. 345.

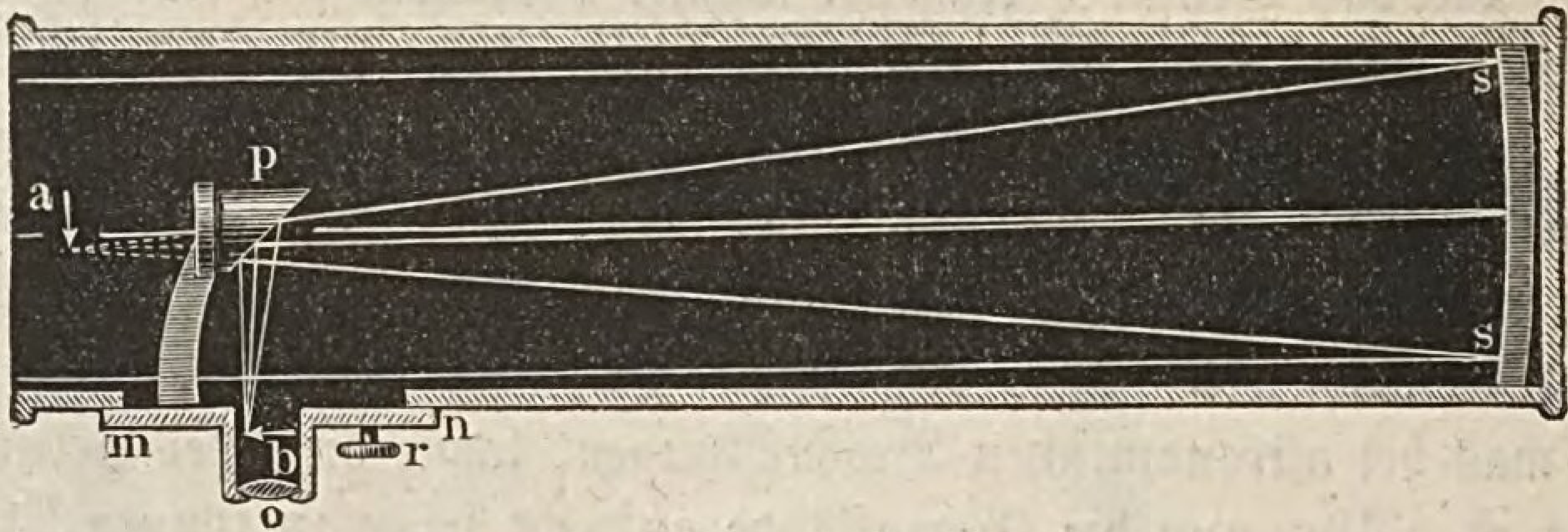
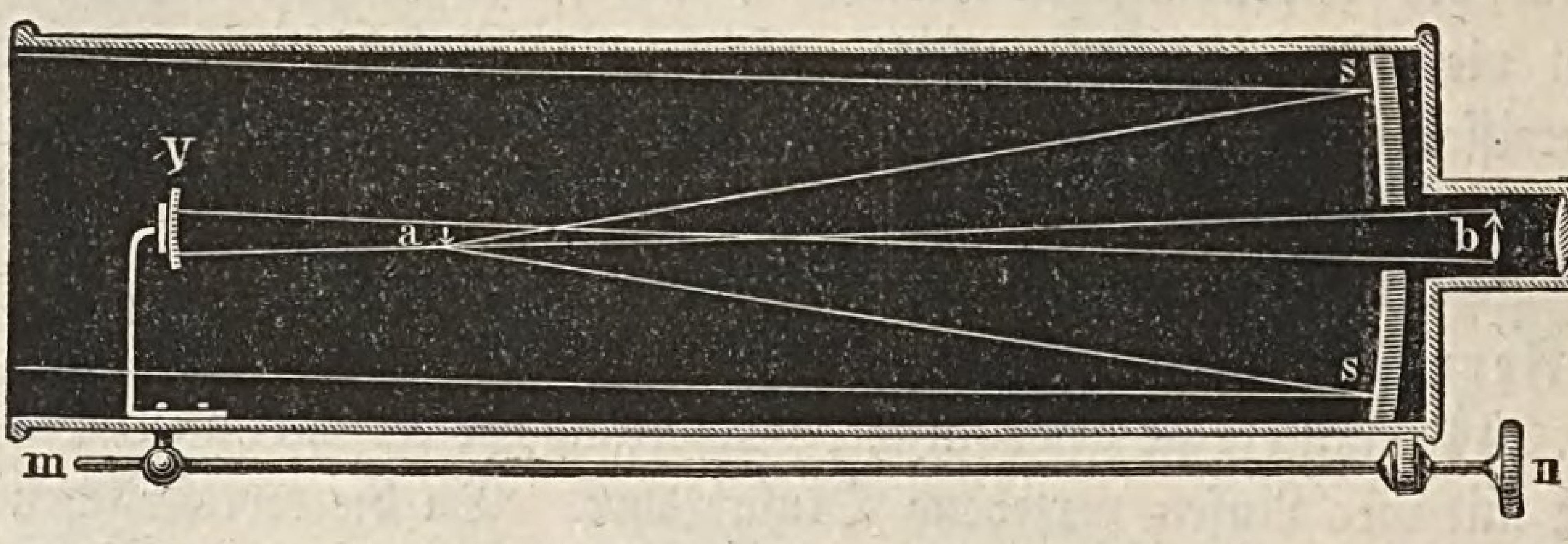


Fig. 346.



ehe jedoch die Strahlen hierher gelangen, werden sie von einem Planspiegel *p*, der 45° gegen die Achse des Rohres geneigt ist, seitwärts reflektiert, so daß das Bild wirklich in *b* entsteht. Dieses Bild wird nun durch das Okular *o* betrachtet.

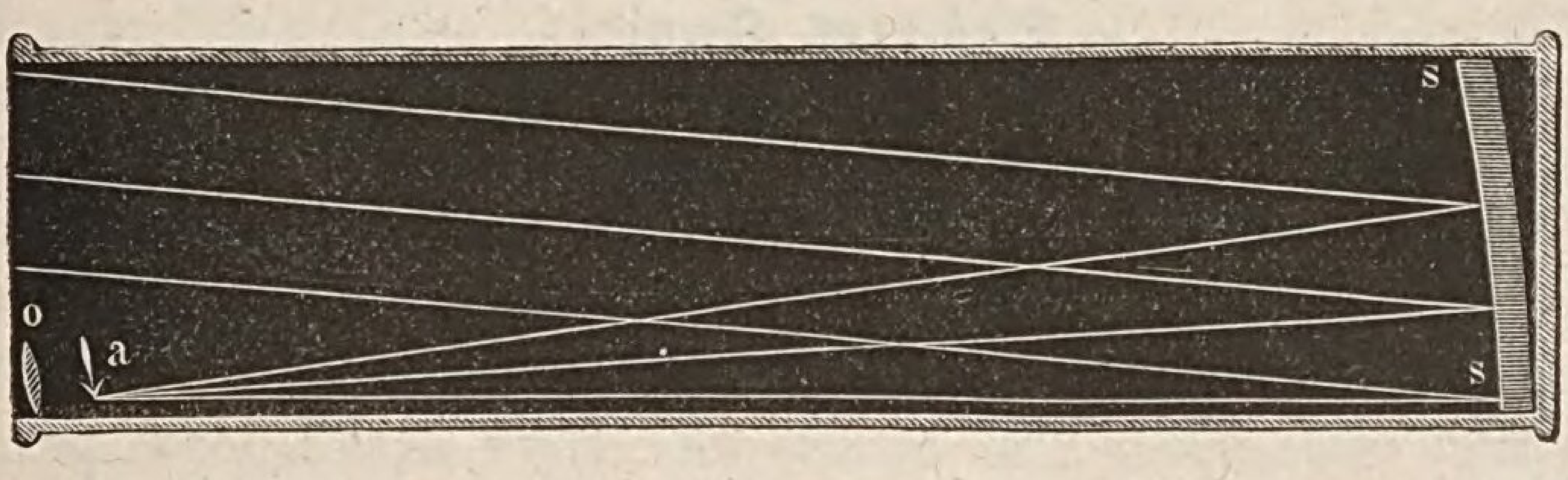
Beim Gregory'schen Teleskope, Fig. 346, ist der Objektivspiegel in der Mitte durchbohrt und hinter dieser Öffnung das Okular angebracht. Die einfallenden Strahlen werden so reflektiert, daß in *a* ein verkehrtes reelles Bild des fernen Gegenstandes entsteht; dieses Bild nun befindet sich nahe vor dem Brennpunkte des kleinen Hohlspiegels *V*, durch welchen vor dem Okulare ein aufrechtes und vergrößertes Bild *b* des verkehrten Bildes *a* entworfen wird. Dieses aufrechte Bild *b* wird nun endlich durch die Okularlinse *o* betrachtet.

Infolge der Erfindung achromatischer Objektive sind die Spiegelteleskope sehr außer Gebrauch gekommen. Nur bei der Konstruktion ganz großer Instrumente verdienen die Hohlspiegel den Vorzug vor den achromatischen Objektiven, weil bei letzteren die Vergrößerung des Durchmessers über gewisse Grenzen

hinaus unüberwindliche Schwierigkeit bietet. Die größten achromatischen Objektive, welche man bis jetzt zu Stande brachte, haben 50 cm Durchmesser, während der Spiegel des großen 12 m langen Teleskopes von Fr. W. Herschel (1738 bis 1822), dessen Leistungen noch nicht durch dioptrische Fernröhre übertroffen worden sind, 120 cm im Durchmesser hat. Rosse konstruierte in neuerer Zeit ein 16 m langes Spiegelteleskop, dessen Spiegel nahezu 2 m im Durchmesser hat.

In diesen großen Spiegelteleskopen, deren Einrichtung durch Fig. 347 erläutert wird, ist kein zweiter Spiegel angebracht. Das durch den Objektiv-

Fig. 347.



spiegel *SS*, welcher etwas schräg gegen die Achse des Instrumentes steht, erzeugte Bild *a* wird unmittelbar durch das am Eingange des Rohres angebrachte Okular *o* betrachtet. Bei dieser Beobachtungsweise kommt freilich der Kopf des Beobachters zwischen das Objekt und den Spiegel, was aber bei dem großen Durchmesser des letzteren nicht schadet.

Herschel nennt diese Instrumente Front view telescops, was man etwa durch Vornschau-Teleskope übersetzen könnte.

Es versteht sich von selbst, daß bei den Spiegelteleskopen eben so wie bei den dioptrischen Fernröhren statt der einfachen Okularlinsen, wie sie die Figuren 345, 346 und 347 zeigen, zusammengesetzte Okulare in Anwendung kommen.

Sechstes Kapitel.

Interferenzerscheinungen.

167 **Hypothesen über das Wesen des Lichtes.** Um die Lichterscheinungen zu erklären, sind zwei verschiedene Hypothesen aufgestellt worden: die Emissions- oder Emanationstheorie und die Vibrations- oder Undulationstheorie.

Die Emissionstheorie nimmt an, daß es eine eigentümliche Lichtmaterie gebe, und daß ein leuchtender Körper nach allen Seiten hin Teilchen dieser feinen Materie mit so ungeheurer Geschwindigkeit aussende, daß ein solches Lichtteilchen in 8 Minuten und 13 Sekunden von der Sonne zur Erde gelangt. Diese Lichtmaterie muß man natürlich als äußerst fein und den Wirkungen der Schwere nicht unterworfen, also als imponderabel annehmen. Die Verschiedenheit der Farben rührt von einer Verschiedenheit in der Geschwindigkeit her; die Reflexion ist nach dieser Ansicht dem Abprallen elastischer Körper analog. Um nach dieser Theorie die Brechung zu erklären, müßte man annehmen: 1) daß sich in den durchsichtigen Körpern hinreichend große Zwischenräume befinden, um den Lichtteilchen den Durchgang zu gestatten, und 2) daß die wägbaren Moleküle auf die Lichtteilchen eine anziehende Kraft ausüben, welche im Verein mit der einmal erlangten Geschwindigkeit der Lichtteilchen ihre Ablenkung bewirkt.

Die Vibrationstheorie dagegen nimmt an, daß das Licht in Schwingungen der Teilchen eines unwägbaren Stoffes besteht, welcher den Namen Äther führt. Nach dieser Theorie ist das Licht etwas dem Schalle Ähnliches; während aber der Schall durch die Schwingungen der wägbaren Materie fortgepflanzt wird, pflanzt sich das Licht durch die Schwingungen des Äthers fort. Da das Licht alle Räume des Himmels durchdringt, so muß auch der Äther den ganzen Weltraum erfüllen. Der Äther ist aber nicht bloß in den sonst leeren Räumen verbreitet, welche die Gestirne trennen, er durchdringt auch alle Körper und füllt die zwischen den Molekülen und Atomen befindlichen Räume aus.

Wo nun der Äther in Ruhe ist, da herrscht vollkommene Finsternis; wird er aber an einer Stelle in Schwingungen versetzt, so pflanzen sich die Lichtwellen nach allen Seiten hin fort, ebenso wie sich die Schallwellen in einer ruhigen Atmosphäre weithin verbreiten. Das Licht, welches in einer Bewegung besteht, ist also von dem Äther selbst wohl zu unterscheiden, ebenso wie die schwingende Bewegung, aus welcher der Schall besteht, von den schwingenden Teilchen der wägbaren Materie unterschieden wird.

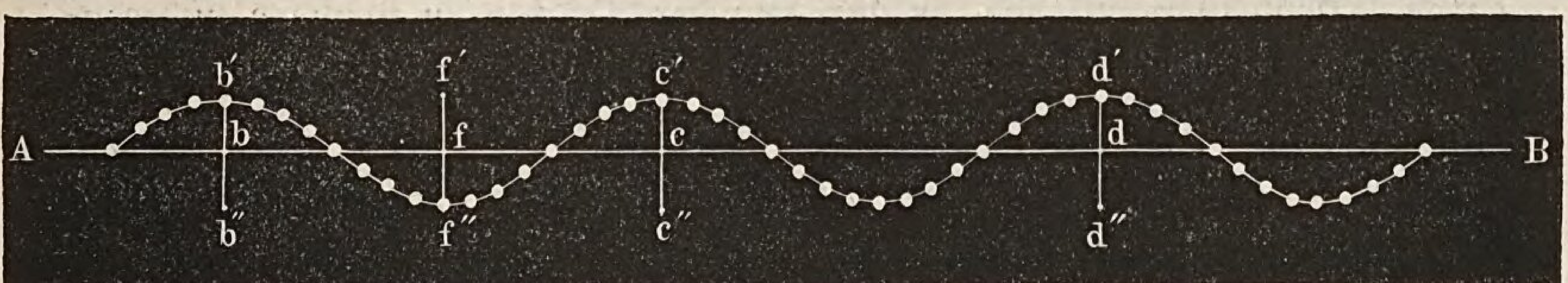
Um die Brechung des Lichtes zu erklären muß man annehmen, daß die Räume zwischen den kleinsten Teilchen der wägbaren Stoffe mit verdichtetem Äther erfüllt sind (§. 15) und daß ferner die Geschwindigkeit des Lichtes, d. i. die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Ätherwellen der Wurzel aus der Elasticität des Äthers direkt und der Wurzel aus der Dichtigkeit desselben indirekt proportional ist. Der Brechungsexponent beim Übergang des Lichtes aus einem Stoffe *A* in einen anderen *B* ist gleich dem Quotienten der Geschwindigkeit des Lichtes in *A* dividiert durch die Geschwindigkeit in *B*. Die Ableitung dieses Satzes würde uns hier zu weit führen; man findet sie im Lehrbuch der Physik.

Lange Zeit hindurch fanden beide Theorien Anhänger unter den Physikern. Newton hatte die Emanationstheorie aufgestellt, Chr. Huyghens (1629 bis 1695) ist als Schöpfer der Undulationstheorie zu betrachten. Das gründliche Studium derjenigen Lichterscheinungen, welche in den folgenden Paragraphen besprochen werden, hat der Undulationstheorie einen entschiedenen Sieg verschafft. Diese Erscheinungen lassen sich nämlich durch die Annahme von Ätherwellen sehr leicht, durch die Annahme von Lichtteilchen aber gar nicht erklären.

Elemente der Vibrationstheorie. Im allgemeinen schwingen 168
die Teilchen eines leuchtenden Körpers auf ähnliche Weise, wie dies bei den schallenden Körpern der Fall ist, nur sind die Lichtschwingungen ungleich schneller als die Schallschwingungen und werden auch nicht durch die wägbare Materie selbst, sondern durch den Lichtäther fortgepflanzt.

Wenn sich ein Lichtstrahl in der Richtung von *A* nach *B*, Fig. 348, fortpflanzt, so schwingen alle Ätherteilchen, welche im Zustande des Gleichgewich-

Fig. 348.



tes auf der geraden Linie *AB* liegen würden, in Richtungen, die rechtwinklig auf *AB* stehen, ungefähr so, wie die Teile eines gespannten Seiles schwingen, wenn man an dem einen Ende einen kräftigen Schlag gegen dasselbe geführt hat. Die Kurve in Fig. 348 stellt die gegenseitige Stellung der schwingenden Teilchen in einem bestimmten Zeitpunkt der Bewegung dar.

Betrachten wir die Schwingungen eines Ätherteilchens etwas genauer! Das Teilchen, dessen Gleichgewichtslage b ist, vibriert von b nach b', von da nach b'' und dann beständig zwischen b' und b'' hin und her. In b' ist seine Geschwindigkeit Null; je mehr sich aber das Teilchen der Gleichgewichtslage nähert, desto mehr wächst seine Geschwindigkeit, welche ihr Maximum in dem Augenblick erreicht, in welchem das Teilchen durch die Gleichgewichtslage hindurchgeht; von nun an nimmt die Geschwindigkeit wieder ab, bis sie endlich in b'' wieder Null wird, worauf dann die Bewegung nach entgegengesetzter Richtung beginnt.

Obgleich sich das Licht mit außerordentlicher Geschwindigkeit fortpflanzt, so geschieht diese Fortpflanzung doch nicht augenblicklich; die Schwingungen eines Ätherteilchens teilen sich also auch nicht momentan den in der Richtung des Strahles folgenden Teilchen mit. Stellen wir uns vor, die ganze Reihe von Teilchen auf der Linie AB sei in Ruhe und das Teilchen in b beginne nun in einem bestimmten Zeitpunkte seine Schwingungen, so werden alle weiter nach B hin liegenden Teilchen später zu schwingen beginnen, und zwar um so später, je weiter sie von b entfernt sind; während das Teilchen b eine vollständige Schwingung macht, wird sich die Bewegung bis zu irgend einem Teilchen c fortpflanzen, so daß dieses Teilchen seine erste Schwingung zu derselben Zeit beginnt, in welcher b seine zweite anfängt. Von nun an werden die Teilchen b und c stets in gleichen Schwingungszuständen sich befinden, d. h. sie werden gleichzeitig sich nach derselben Seite hin bewegen, durch die Gleichgewichtslage hindurchgehen und gleichzeitig das Maximum der Ausweichung auf der einen und auf der anderen Seite von AB erreichen.

Die Entfernung bc eines Ätherteilchens von dem nächsten, welches sich mit ihm in gleichen Schwingungszuständen befindet, heißt, wie wir bereits gesehen haben, eine Wellenlänge. Wenn cd auch eine Wellenlänge ist, so wird das Teilchen d seine erste Schwingung in demselben Augenblicke beginnen, in welchem c seine zweite und b seine dritte Schwingung beginnt; d wird sich von nun an mit c und b stets in gleichen Schwingungszuständen befinden.

Wenn f in der Mitte zwischen b und c liegt, d. h. wenn es um eine halbe Wellenlänge von b entfernt ist, so befindet sich das Teilchen f stets in einem Schwingungszustande, welcher dem der Teilchen in b und c entgegengesetzt ist. Wenn b und c das Maximum der Ausweichung oberhalb AB erreichen, so erreicht f das Maximum der entgegengesetzten Seite. Das Teilchen f geht mit b und c gleichzeitig durch die Gleichgewichtslage, allein in entgegengesetzter Richtung.

Wenn zwei Ätherteilchen auf dem Wege eines Lichtstrahls um $1/2$ Wellenlänge von einander entfernt sind, so haben sie stets gleiche, aber entgegengesetzte Geschwindigkeiten. Dasselbe gilt von solchen Teilchen, die um $3/2$, $5/2$, $7/2$, überhaupt um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander abstehen.

Die Wellenlänge ist für die verschiedenen Farben nicht gleich; am größten ist die Wellenlänge der roten, am kleinsten die Wellenlänge der violetten Strahlen. Wie es möglich war, die Wellenlänge der verschiedenfarbigen Strahlen mit außerordentlicher Genauigkeit zu bestimmen, können wir hier nicht weiter anführen.

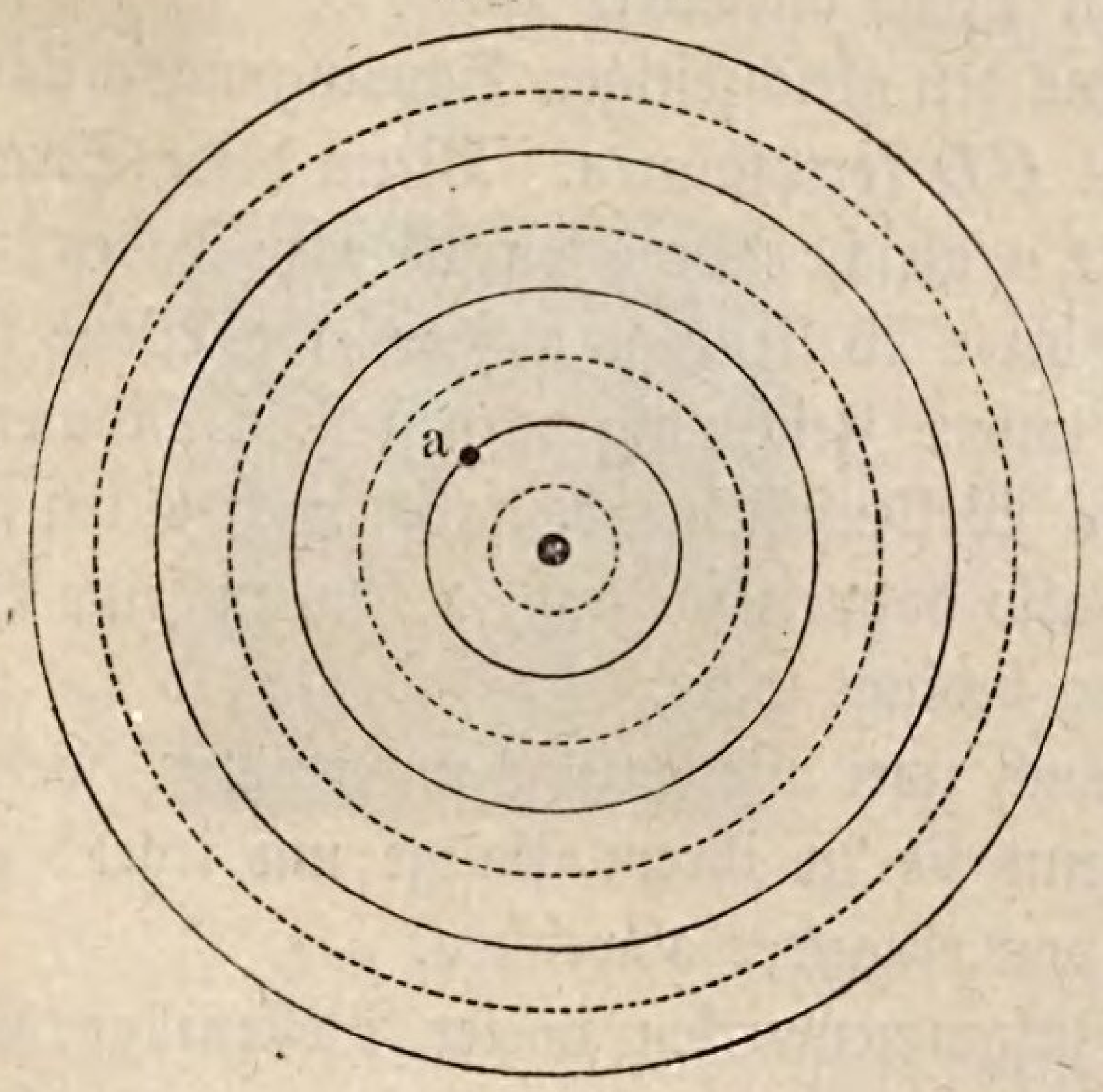
Mit der ungleichen Wellenlänge hängt auch die ungleiche Schwingungsdauer zusammen; die Schwingungen der violetten Strahlen sind die schnellsten, die der roten dagegen die langsamsten.

Man sieht also, daß sich beim Lichte die Verschiedenheit der Farben ebenso verhält wie beim Schall die verschiedene Höhe und Tiefe der Töne.

Von der Art und Weise, wie sich von einem leuchtenden Punkte aus die Lichtwellen ringsum verbreiten, kann man sich ein recht deutliches Bild machen, wenn man die Wellen betrachtet, welche auf der Oberfläche eines stillstehenden Wassers entstehen, in das ein Stein geworfen wurde.

Von der Stelle aus, an welcher der Stein in das Wasser einfiel, verbreiten sich ringsum kreisförmige Wellen. Die Wasserteilchen an der getroffenen Stelle gehen abwechselnd auf und nieder, und diese Bewegung pflanzt sich ringsum mit gleicher Geschwindigkeit fort; alle Wasserteilchen also, welche gleichweit von dem Mittelpunkte entfernt sind, werden sich auch in gleichen Schwingungszuständen befinden, d. h. sie werden gleichzeitig ihre höchste und gleichzeitig ihre tiefste Stellung erreichen; es werden sich also konzentrische Wellenberge und Wellenthäler bilden, wie dies durch Fig. 349 anschaulich gemacht werden soll. Wenn für einen bestimmten Moment die ausgezogenen Kreise den Wellenbergen, die punktierten aber den Wellenthälern entsprechen, so werden die Wellenberge nach außen hin in der Weise fortschreiten, daß nach einer kurzen Zeit gerade an den punktierten Stellen sich die Wellenberge befinden, die Thäler aber in den ausgezogenen Kreisen.

Fig. 349.



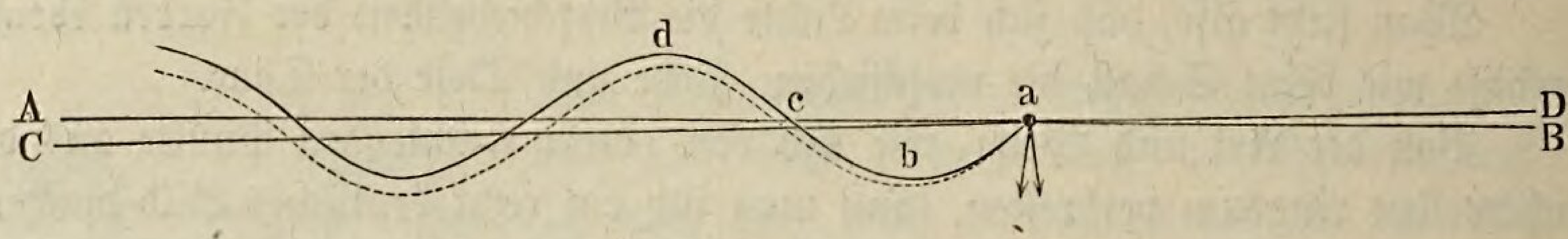
So wie sich die Wasserwellen in konzentrischen Kreisen um die Einfallsstelle des Steins verbreiten, so verbreiten sich die Ätherwellen in konzentrischen Kugelschichten um die Lichtquelle; die Oberfläche der Lichtwellen ist kugelförmig, wenigstens so lange die Elasticität des Äthers nach allen Richtungen hin dieselbe bleibt.

Interferenz der Lichtstrahlen. Wir werden schon im nächsten 169
Paragraphen die Erscheinung kennen lernen, daß durch das Zusammenwirken zweier Lichtstrahlen bald verstärktes Licht, bald aber vollkommene Dunkelheit erzeugt wird.

Eine solche durch das Zusammenwirken zweier Lichtstrahlen hervorgebrachte Verstärkung oder Aufhebung wird mit dem Namen **Interferenz** der Lichtstrahlen bezeichnet. Die Interferenz der Lichtstrahlen läßt sich folgendermaßen erklären.

In Fig. 350 mögen die Linien AB und CD zwei elementare Lichtstrahlen darstellen, welche von der nämlichen Lichtquelle ausgehen und auf verschiedenen Wegen zu dem Punkte a gelangen, wo sie sich unter einem sehr

Fig. 350.



spitzen Winkel schneiden. Wenn der Weg, welchen der Lichtstrahl CD von der Lichtquelle an bis zu dem Punkte a zurückgelegt hat, gerade eben so groß oder um 1, 2, 3 ... n ganze Wellenlängen größer ist, als die Länge von derselben Lichtquelle bis zu dem Punkte a auf dem Wege des anderen Strahles, so werden die beiden Strahlen in a in der Weise zusammenwirken, wie es Fig. 350 darstellt.

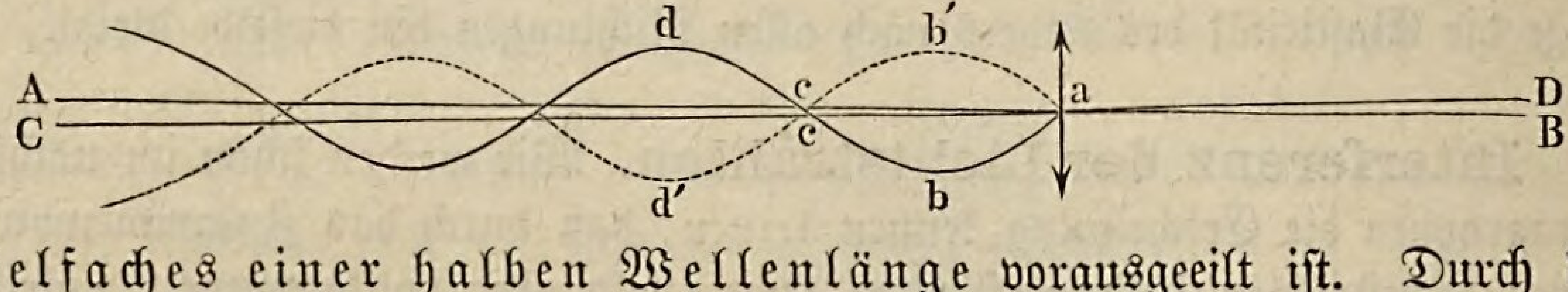
Die Wellenlinie $dcba$ stellt für irgend einen Zeitpunkt die gegenseitige Lage der Ätherteilchen dar, welche den Strahl in der Richtung AB fortpflanzen. Das Teilchen b hat eben seine äußerste Stellung unterhalb AB erreicht, das Teilchen a durchläuft eben die Gleichgewichtslage in der Richtung, welche der eine der beiden kleinen Pfeile andeutet.

Die punktierte Wellenlinie zeigt uns den gleichzeitigen Schwingungszustand der Ätherteilchen, welche den Lichtstrahl CD fortpflanzen. Wenn beide Strahlen von der Lichtquelle bis zum Punkte a gleiche Wege durchlaufen haben, so wird das Teilchen a gleichzeitig durch beide Wellenzüge auf dieselbe Weise zur Bewegung angetrieben; in dem durch unsere Zeichnung dargestellten Momente wird das Teilchen a durch das zweite Wellensystem ebenfalls nach unten getrieben, die Schwingungsintensität ist also doppelt so groß, als wenn seine Bewegung nur durch den einen Wellenzug bedingt wäre.

In derselben Weise müssen sich auch zwei Wellenzüge unterstützen, welche in einem Punkte zusammentreffen, wenn sie in ihrem Gange um irgend ein Ganzes Vielfaches einer Wellenlänge von einander abweichen.

Die Fig. 351 versinnlicht das Zusammenwirken zweier Wellenzüge, von denen der eine dem anderen um eine **halbe** oder irgend ein **ungerades**

Fig. 351.



Vielfaches einer halben Wellenlänge vorausgeeilt ist. Durch den einen Wellenzug, dessen Wellenlinie ausgezogen ist, wird das Teilchen a in

demselben Augenblicke nach unten getrieben, in welchem der andere Wellenzug, dessen Wellenlinie punktiert ist, dasselbe mit gleicher Kraft aufwärts zu bewegen strebt; die beiden entgegengesetzten Kräfte heben sich also auf, das Teilchen *a* bleibt in Ruhe.

Wir haben bisher nur diejenigen Fälle betrachtet, in welchen der Gangunterschied der interferierenden Strahlen ein ganzes Vielfaches einer Wellenlänge oder ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt. Wenn der Gangunterschied zwischen diese Grenzen fällt, so wird durch die Interferenz der beiden Strahlen auch eine Wirkung hervorgebracht, welche zwischen den Wirkungen der besprochenen Grenzfälle liegt, d. h. es wird keine vollkommene Vernichtung der Schwingungen, aber auch keine Verdoppelung der Schwingungsintensität eintreten können. Die wirklich hervorgebrachte Schwingungsintensität nähert sich mehr dem einen oder dem anderen dieser Grenzwerte, je nachdem die Gangunterschiede sich mehr einem ungeraden Vielfachen einer halben Wellenlänge oder einem ganzen Vielfachen einer Wellenlänge nähern.

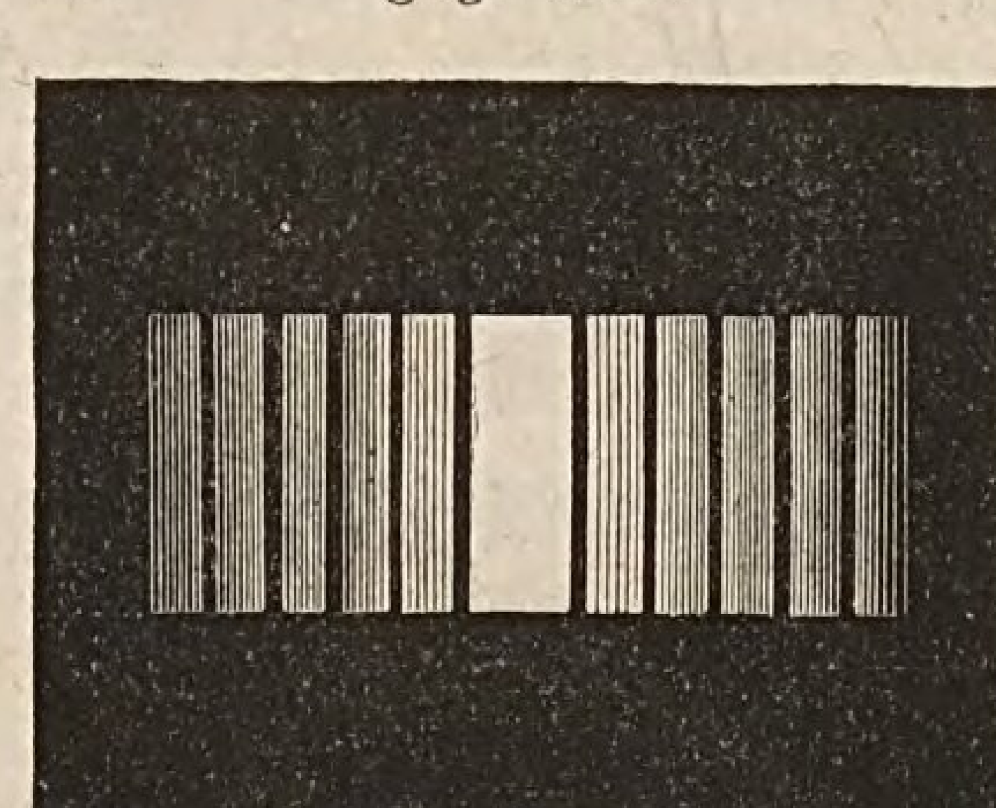
Wir gehen nun zur Betrachtung derjenigen Erscheinungen über, welche sich auf das Princip der Interferenz zurückführen lassen.

Die Beugung des Lichtes. Wenn man das kleine Sonnenbildchen, welches durch Reflexion auf einem innen geschwärzten Uhrglase, auf einem polierten Metallknopfe oder einer Thermometerkugel entsteht, durch eine ganz feine kreisförmige Öffnung betrachtet, wie man sie etwa mit einer feinen Nadel in ein Kartenblatt machen kann, so sieht man einen hellen runden Fleck, umgeben von mehreren farbigen Ringen. Fig. 352 stellt diese Erscheinung dar. 170

Fig. 352.



Fig. 353.



Macht man statt des Punktes einen ganz feinen geradlinigen Spalt in das Kartenblatt und betrachtet man durch diesen die Lichtlinie auf einer innen geschwärzten, in die Sonne gelegten Glasröhre, welche dem Spalte parallel ist, so beobachtet man die Erscheinung Fig. 353. In der Mitte des Bildes sieht man einen hellen Streifen, zu beiden Seiten aber schmälere Farbenstreifen, die nach außen hin immer lichtschwächer werden.

Je feiner die kreisförmige Öffnung und je schmaler der Spalt ist, desto breiter sind die Ringe beziehungsweise die Streifen.

Am einfachsten wird die Erscheinung, wenn man nebst dem Kartenblatte noch ein einfarbiges Glas, etwa ein rotes, vor das Auge hält; alsdann sieht man

durch den Spalt hindurch in der Mitte einen hellen roten Streifen, welcher zu beiden Seiten durch einen schwarzen Streifen begrenzt ist; darauf folgen dann auf beiden Seiten noch mehrere rote Seitenbilder, welche immer schwächer werden, und deren immer eines vom anderen durch einen schwarzen Streifen getrennt ist, ungefähr wie dies in der obersten Reihe Fig. 354 dargestellt ist.

Die hellen Seitenbilder sowohl wie der helle Streifen in der Mitte sind aber durch die schwarzen Streifen nicht scharf abgegrenzt, der Übergang vom hellen Lichte bis zu den dunkelsten Stellen erfolgt nur allmählich.

Durch ein grünes Glas beobachtet man dieselbe Erscheinung, nur sind die Streifen schmäler; noch schmäler sind sie, wenn man ein violettes Glas anwendet, wie dies Fig. 354 angedeutet ist.

Eine zweite für das Verständnis der Beugungserscheinungen weit vorteilhaftere Beobachtungsmethode besteht darin, daß man das Beugungsbild objektiv

Fig. 355.

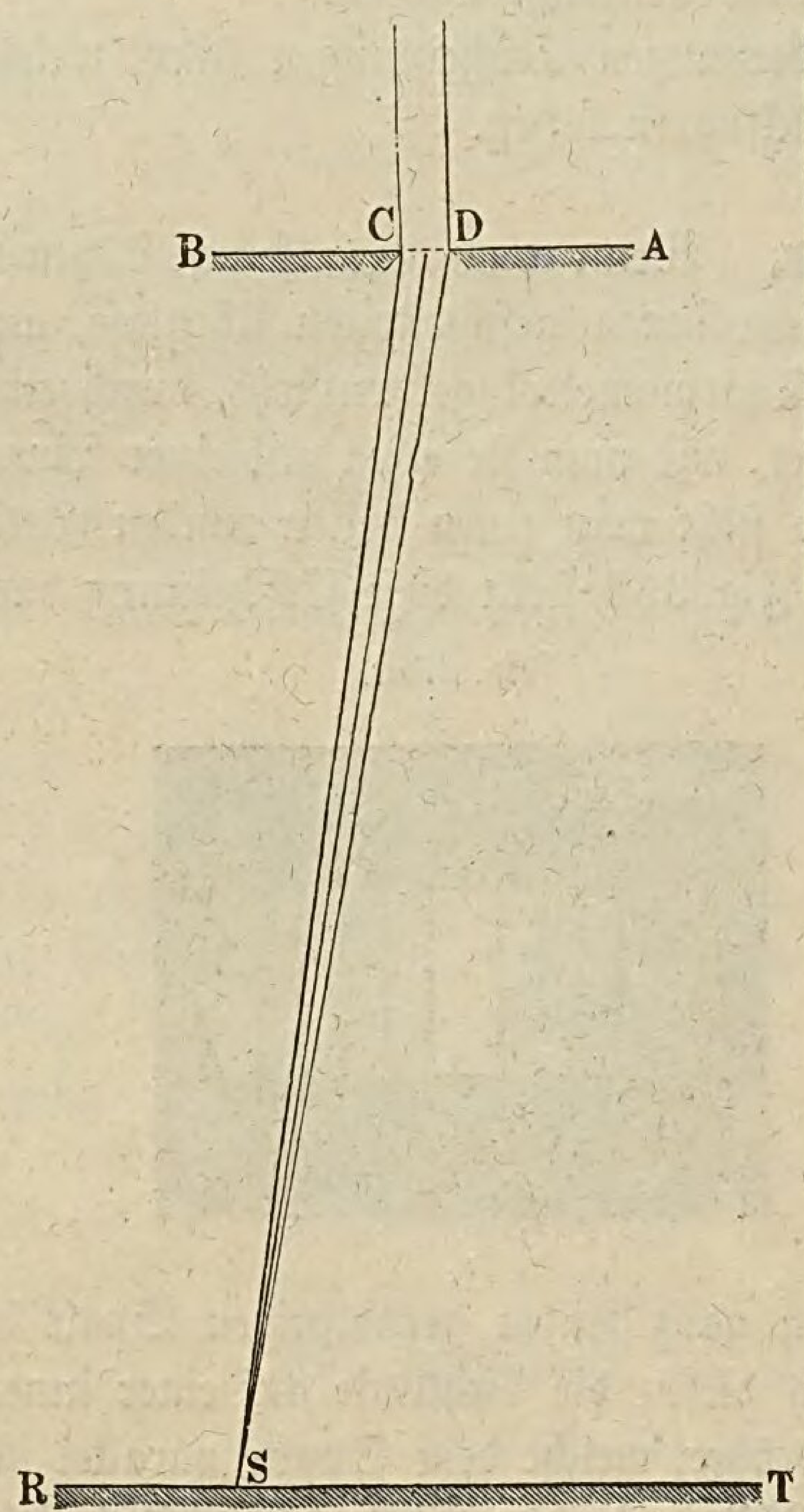
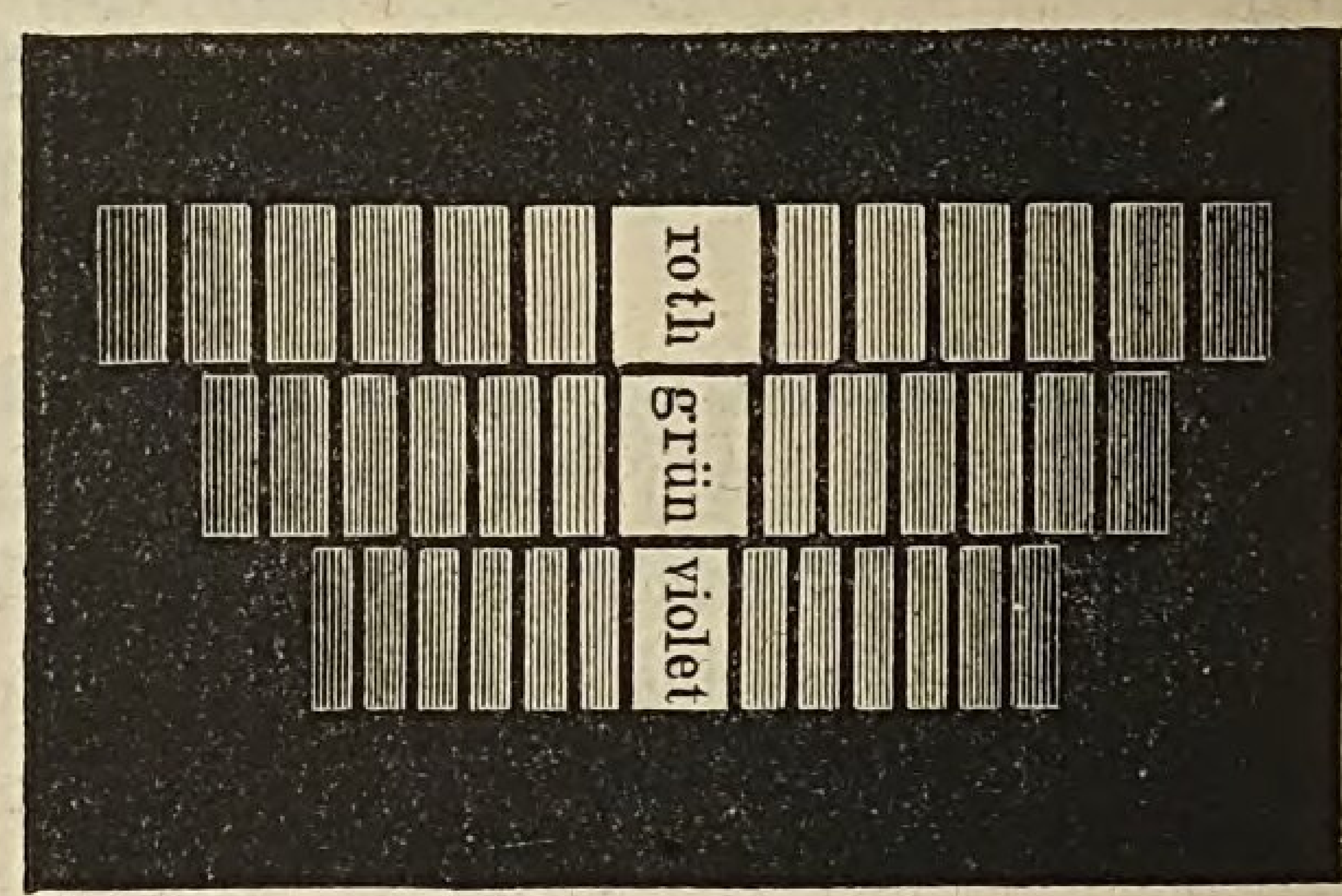


Fig. 354.



auf einem weißen Schirme auffängt. Zu diesem Zwecke läßt man durch einen vertikalen Spalt von ungefähr 2 mm Breite ein Bündel Sonnenstrahlen in horizontaler Richtung in ein dunkles Zimmer eintreten und fängt dasselbe in 8 bis 10 Fuß Entfernung durch einen Schirm *BA*, Fig. 355, auf, in welchem sich ein zweiter, etwa 1 mm breiter, dem ersten paralleler Spalt *CD* befindet. Stellt man endlich 2 bis 3 m hinter dem Schirme *BA* einen zweiten, mit weißem Papier überzogenen Schirm *RT* auf, so erblickt man alsdann auf diesem die Beugungsfigur.

Die Erklärung dieser Erscheinungen kann hier nur kurz angedeutet werden.

Wenn das Licht von einem hinlänglich weit entfernten Punkte senkrecht auf die Ebene des Schirmes *BA* fällt, in welchem sich die Öffnung *CD* befindet, so kann man alle in dieser Öffnung befindlichen Ätherteilchen als gleichweit von der Lichtquelle entfernt betrachten; alle diese Ätherteilchen be=

finden sich also in gleichen Schwingungszuständen. Jedes dieser Ätherteilchen pflanzt aber seine Schwingungen jenseits des Schirmes nach allen Seiten hin so fort, als ob es ein selbstleuchtendes Teilchen wäre; die Stärke der Erleuchtung in irgend einem hinter dem Schirme *BA* gelegenen Punkte *S* hängt also nur davon ab, welche Wirkung durch die Interferenz aller in *S* zusammentreffenden von den verschiedenen Punkten der Öffnung *CD* ausgehenden Wellenzüge hervorgebracht wird.

Die Wellenzüge, welche sich von *CD* aus rechtwinklig zur Öffnung fortpflanzen, werden sich stets unterstützen, weil sie keinen Gangunterschied haben; daher ist die Mitte des Bildes auf dem Schirme *RT* hell. Geht man aber zu Punkten über, die seitwärts liegen, so werden die hier zusammentreffenden Wellenzüge einen Gangunterschied zeigen und sich gegenseitig schwächen; nach der Seite hin muß also die Lichtstärke abnehmen, bis zu einem Punkte, in welchem alle von *CD* aus zusammentreffenden Lichtstrahlen sich vollständig aufheben; hier beobachtet man einen dunklen Streifen.

Noch weiter von der Mitte kommen wieder Punkte, in denen keine vollständige Aufhebung der hier von *CD* aus zusammentreffenden Lichtwellen stattfindet, in welchen also wieder Licht beobachtet wird; darauf folgen wieder dunklere Stellen, in denen sich alle Lichtwellen gegenseitig aufheben u. s. w.

Daß die hellen und dunklen Streifen für verschiedenfarbige Strahlen nicht zusammenfallen, rührt daher, daß sie ungleiche Wellenlängen haben.

Wenn man den Versuch mit weißem Lichte anstellt, so wird man in der Mitte des Beugungsbildes einen weißen Streifen sehen, weil hier das Maximum der Lichtstärke für alle Farben zusammentrifft; die Seitenbilder sind aber gefärbt, nirgends ist mehr ein ganz weißer oder ganz schwarzer Streifen zu sehen, denn da, wo für eine Farbe ein schwarzer Streifen ist, ist für eine andere Farbe ein heller Streifen.

Die Form der Beugungserscheinungen hängt von der Form und der Anzahl der Öffnungen ab.

Wenn zwei feine kreisförmige Öffnungen im Schirme ganz nahe beisammenstehen, so erblickt man, nach einem Lichtpunkte hinsehend, wieder dieselben Ringe, Fig. 352, wie wenn nur eine Öffnung da ist; diese Ringe erscheinen aber durch gerade schwarze Streifen durchschnitten, welche auf der Richtung der Verbindungslinie beider Öffnungen rechtwinklig stehen und durch den centralen hellen Fleck, Fig. 352, hindurchgehen.

Dieser Versuch beweist klar, daß durch das Zusammenwirken zweier Lichtstrahlen Dunkelheit entstehen, oder mit anderen Worten, daß die Wirkung eines Lichtstrahls durch die eines anderen aufgehoben werden kann. Wenn das Licht nur durch eine Öffnung einfällt, so erblickt man die Fig. 352; sobald aber die zweite Öffnung hinzukommt, erscheinen schwarze Streifen in den hellen Teilen dieses Bildes; hier wird also die Lichtwirkung der durch die eine Öffnung einfallenden Strahlen durch diejenigen Strahlen aufgehoben, welche durch die andere Öffnung kommen.

Sehr schön sind die Beugungserscheinungen, welche man durch eine Reihe

feiner Öffnungen, etwa durch eine Reihe paralleler feiner Linien, die auf eine Glasplatte radiert sind, erblickt. In diese Klasse der Erscheinungen gehört auch diejenige, welche man wahrnimmt, wenn man durch den Bart der Feder eines kleineren Vogels nach einem Lichtpunkte sieht; diese Erscheinung ist schon sehr brillant, wenn man statt des Lichtpunktes nur ein Kerzenlicht anwendet.

Wenn man auf eine Glasplatte sogenannten Bärlappsamen (semen lycopodii) streut und dadurch nach einer Kerze sieht, so erblickt man eine schöne, aus mehreren farbigen Ringen zusammengesetzte Glorie. Auch dies ist eine Beugungserscheinung.

171 **Länge der Lichtwellen.** Es ist bereits oben erwähnt worden, daß die Länge der Lichtwellen für verschiedene Farben nicht gleich ist. Die genaue Messung der Beugungserscheinungen macht es nun möglich, die Länge der Lichtwellen trotz ihrer Kleinheit mit großer Genauigkeit zu ermitteln.

Folgendes ist die Länge der Lichtwellen für die verschiedenen farbigen Strahlen:

Mittleres Rot	0,00067 mm
„ Gelb	0,00058
„ Grün	0,00052
„ Blau	0,00047
„ Indigo	0,00043
„ Violett	0,00039

Kennt man die Wellenlänge, so kann man auch die Schwingungszahl der Lichtwellen berechnen, da man ja weiß, daß das Licht in der Sekunde einen Weg von 300 000 km zurücklegt und während jeder Schwingung um eine Wellenlänge fortschreitet. Es ergeben sich:

für rotes Licht	477 000 000 000 000
für violettes Licht . . .	699 000 000 000 000

Schwingungen in der Sekunde. Ausführlicheres über die Berechnung der Wellenlänge, sowie über Beugungserscheinungen überhaupt findet man in dem Lehrbuch der Physik und im mathematischen Supplementband.

172 **Farben dünner Blättchen.** Wenn ein durchsichtiger Körper hinlänglich dünne Schichten bildet, so erscheint er lebhaft gefärbt, wie man dies am leichtesten an Seifenblasen sehen kann. Die Flitterchen einer vor der Glasbläserlampe bis zum Zerplatzen aufgeblasenen Glaskugel schillern in den glänzendsten Farben. Ähnliche Farben beobachtet man, wenn ein Tropfen Öl (am besten ein ätherisches Öl, z. B. Terpentinöl) sich auf einer Wasserfläche ausbreitet; oder wenn ein glänzendes Metallstück, im Feuer erhitzt, sich allmählich mit einer Oxydschicht überzieht (Anlaufen des Stahls). Auch dünne Luftschichten bringen solche Farben hervor, die man oft an Sprüngen in Krystallen oder in etwas dicken Glasmassen sehen kann.

In der größten Regelmäßigkeit zeigen sich diese Farben in Form von Ringen, wenn man eine Glaslinse von großer Brennweite auf eine ebene Glas-

tafel, oder umgekehrt die ebene Glastafel auf die Linse legt. Newton, welcher diese Farbenringe studierte, die auch nach ihm gewöhnlich Newton'sche Ringe genannt werden, wandte Linsen an, deren Brennweite 3 bis 5 m betrug. Da, wo die Glastafel die Linse berührt, sieht man im reflektierten Lichte einen schwarzen Fleck, der mit farbigen konzentrischen Ringen umgeben ist, die nach außen hin immer schmäler und matter werden, ungefähr wie Fig. 356 zeigt.

Betrachtet man die Ringe durch ein einfarbiges Glas, so sieht man nur abwechselnd helle und dunkle Ringe. Für rotes Licht sind diese Ringe weiter, als für grünes; für grünes weiter, als für violettes. Wenn man aber statt des farbigen Lichtes weißes anwendet, so kann man nirgends mehr einen ganz schwarzen und nirgends mehr einen ganz weißen Ring sehen, weil weder die hellen noch die dunklen Ringe der verschiedenen Farben zusammenfallen; überall sieht man Farben, die nicht mehr reine Farben des Spektrums, sondern Mischfarben sind.

Diese Farbenerscheinungen lassen sich folgendermaßen erklären:

Wenn Lichtstrahlen auf eine dünne Schicht eines durchsichtigen Körpers fallen, so werden sie teilweise an der oberen, teilweise an der unteren Fläche

Fig. 356.

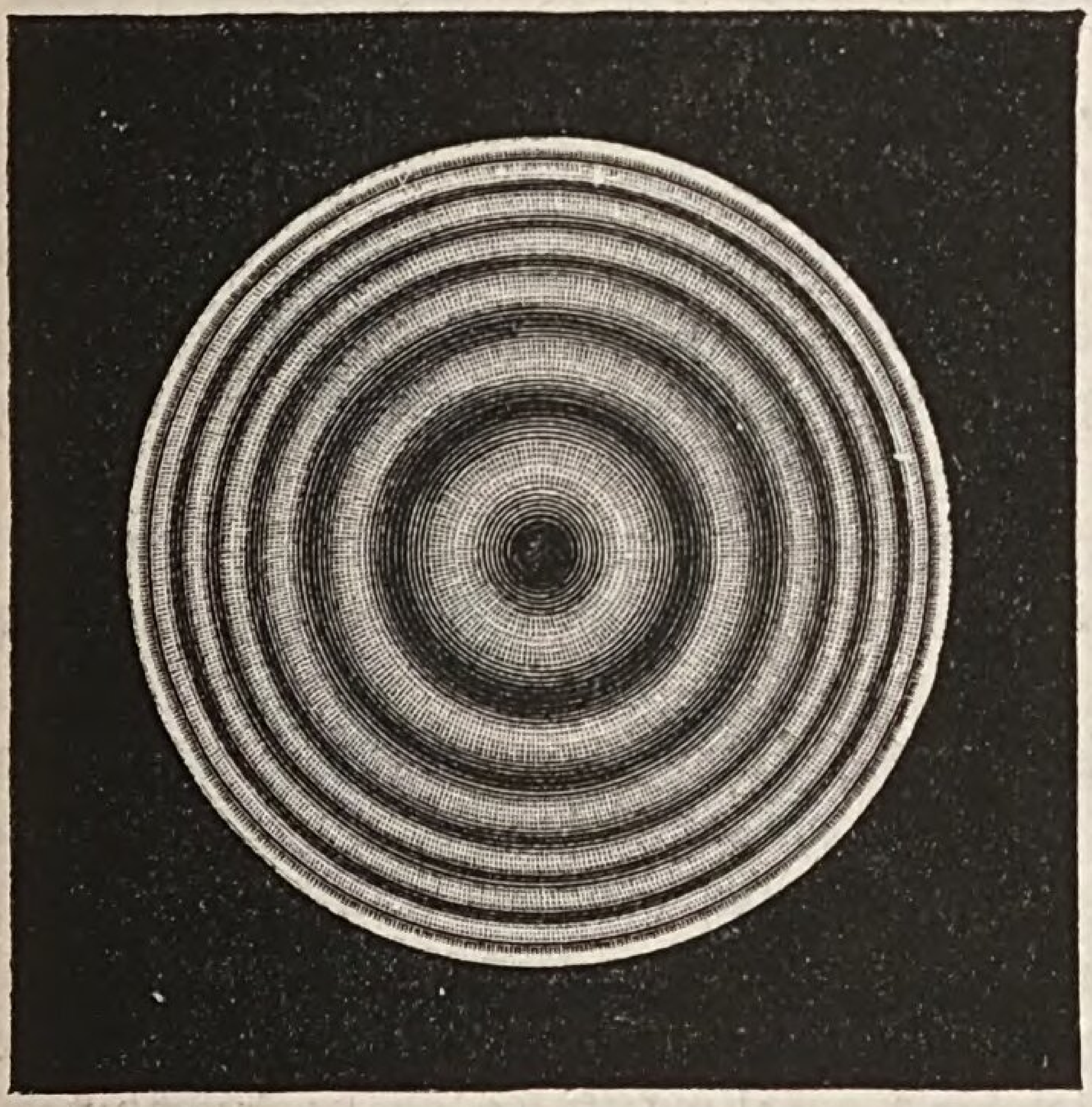
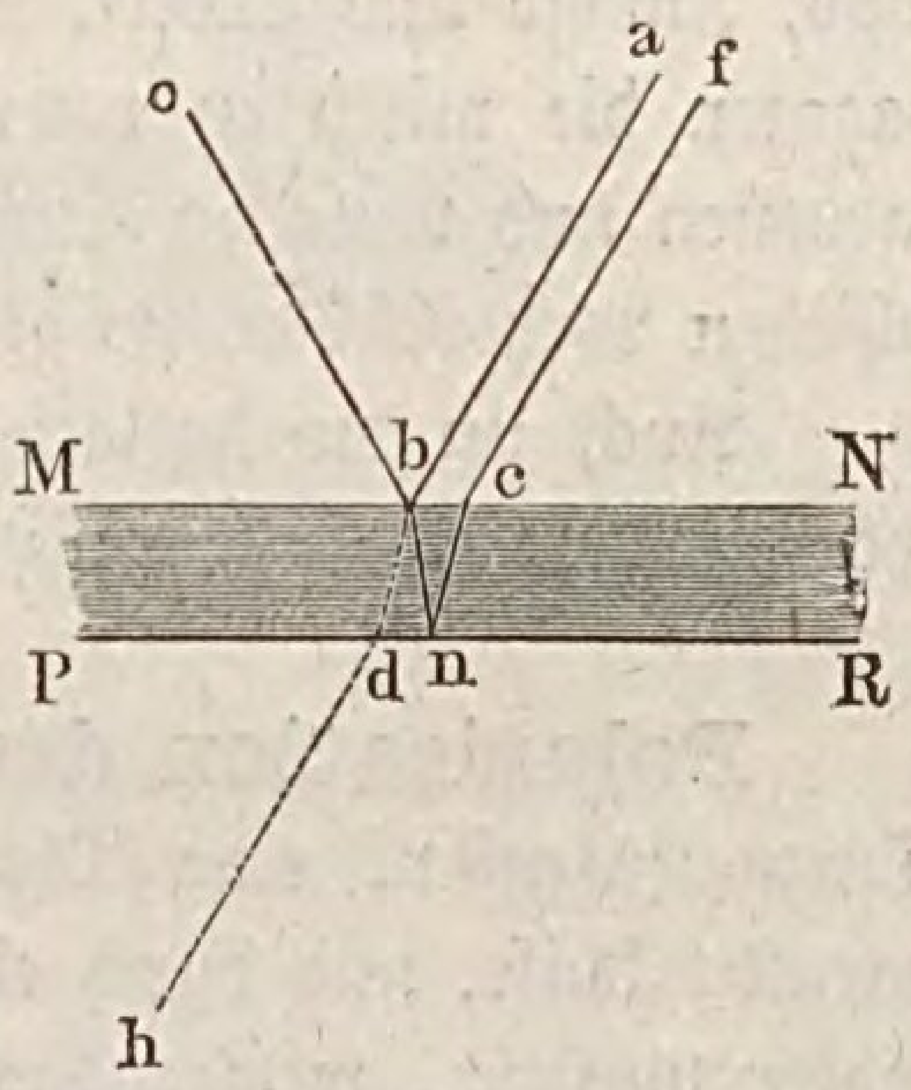


Fig. 357.



derselben reflektiert; die von beiden Flächen reflektierten Lichtstrahlen werden interferieren und sich je nach der Differenz der durchlaufenen Wege bald gegenseitig vernichten, bald verstärken.

Betrachten wir diesen Hergang der Sache etwas näher. In Fig. 357 stelle *MNPR* eine dünne Schicht irgend eines durchsichtigen Körpers vor, welche durch ein Bündel paralleler Strahlen getroffen wird; irgend einer dieser Strahlen *ab* wird nun teilweise in der Richtung *bo* reflektiert, teilweise aber nach *d* gebrochen. Von letzterem wollen wir vor der Hand keine Notiz nehmen.

Ein zweiter mit ab paralleler Strahl fc erleidet in c gleichfalls eine Reflexion und eine Refraktion; der gebrochene Strahl wird in n teilweise nach nb gespiegelt und tritt dann in derselben Richtung bo aus, wie der zuerst betrachtete in b gespiegelte Strahl. Die beiden nach der gleichen Richtung bo sich fortpflanzenden Strahlen müssen also interferieren und zwar werden sie sich gegenseitig aufheben, wenn die Dicke der Platte von der Art ist, daß der Gangunterschied der beiden interferierenden Strahlen gleich $^1/_2$, $^3/_2$, $^5/_2$, also ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt; Verstärkung des Lichtes findet statt, wenn der Gangunterschied 1, 2, 3 .... Wellenlängen ist.

Wie kommt es aber, daß nur dünne Schichten solche Farben zeigen und daß Blättchen von einiger Dicke sie schon nicht mehr zeigen? Nehmen wir, der leichteren Übersicht wegen, an, die Lichtwellen der violetten Strahlen seien halb so groß wie die der roten (sie sind in der That noch etwas größer), so werden auch die Durchmesser der violetten Ringe halb so groß sein als die der roten; an derselben Stelle, wo der erste dunkle Ring für rotes Licht ist, liegt auch der zweite dunkle Ring für violettes Licht und ein heller Ring für eine ungefähr in der Mitte zwischen Rot und Violett liegende Farbe; diese Farbe ist an dieser Stelle entschieden vorherrschend.

An der Stelle, wo der siebente dunkle Ring für rotes Licht liegt, wird der vierzehnte dunkle Ring für violettes Licht liegen; an derselben Stelle befinden sich also noch sechs dunkle Ringe und sieben helle Ringe für zwischenliegende Farben. Wenn also das äußerste Rot, die Grenze zwischen Rot und Orange, zwischen Orange und Gelb, Gelb und Grün, Grün und Blau, Blau und Indigo, Indigo und Violett und das äußerste Violett im Minimum sind, so sind dagegen die mittleren roten, orangefarbigen, gelben, grünen, blauen, indigofarbenen und violetten Strahlen im Maximum; keine dieser Farben kann entschieden vorherrschen, sie geben zusammen Weiß.

Auch im durchgelassenen Lichte zeigen dünne Blättchen ähnliche, jedoch weit mattere Farben, welche zu denen im reflektierten Lichte komplementär sind.

173 **Polarisation des Lichtes.** Wenn man aus einem durchsichtigen Turmalinkrystall eine Platte schneidet, deren Oberfläche mit der Säulenachse parallel läuft, und durch eine solche Turmalinplatte nach einer polierten Tischplatte hinsieht, welche das Licht des Himmels ungefähr unter einem Winkel von 30 bis 40° nach dem Auge reflektiert, so sieht man die polierte Fläche bald hell, bald dunkel, je nachdem man die Turmalinplatte um eine senkrecht zu ihrer Ebene liegende Achse dreht; sie läßt also nicht in jeder Lage die von der Tischplatte reflektierten Strahlen durch. Die Lichtstrahlen haben also durch die Reflexion auf der polierten Tafel eine besondere Eigenschaft erlangt, welche man mit dem Namen der Polarisation bezeichnet.

Hätte man die unter ähnlichen Umständen von einer Glasplatte reflektierten Strahlen mit der Turmalinplatte untersucht, so hätte man dieselbe Erscheinung beobachtet; also auch durch die Reflexion auf einer Glasfläche können die Lichtstrahlen polarisiert werden.

Auch die Turmalinplatte läßt sich durch einen Glasspiegel ersetzen.

Trifft ein gewöhnlicher Lichtstrahl *ab*, Fig. 358, so auf eine ebene Glastafel *fghi*, daß er mit dieser einen Winkel von $35^1/_2{}^0$ bildet, so wird er zum großen Teil nach den gewöhnlichen Gesetzen in der Richtung *bc* reflektiert. Der in der Richtung *bc* gespiegelte Strahl ist nun durch diese Reflexion polarisiert. Damit jedoch die Glastafel *fghi* nicht auch die von den unter ihr befindlichen Gegenständen ausgehenden Lichtstrahlen hindurchlasse, welche sonst auch in der Richtung *bc* sich fortpflanzen würden, muß dieselbe entweder aus schwarzem Glase verfertigt oder auf der Rückseite geschwärzt sein.

Fig. 358.

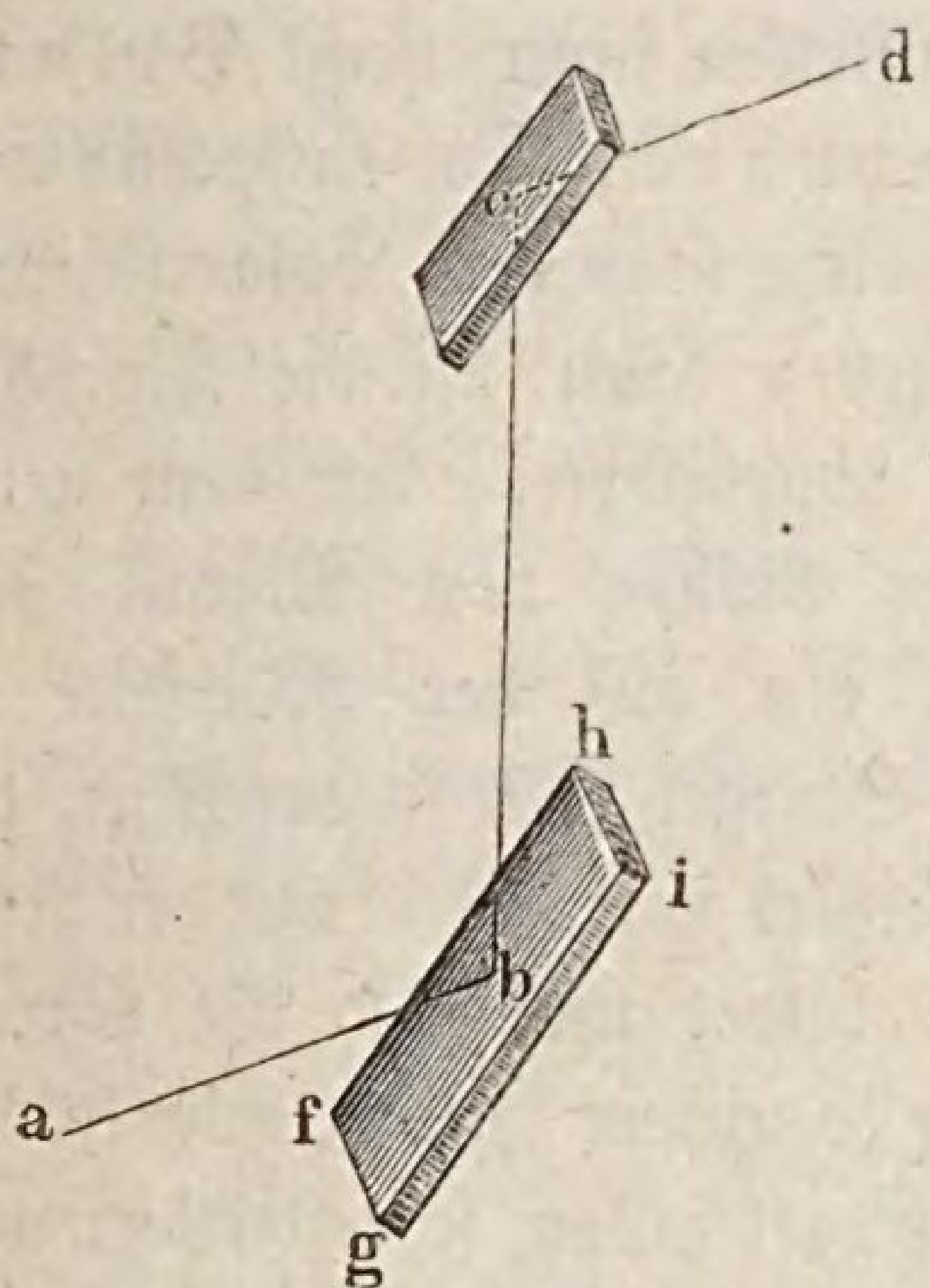
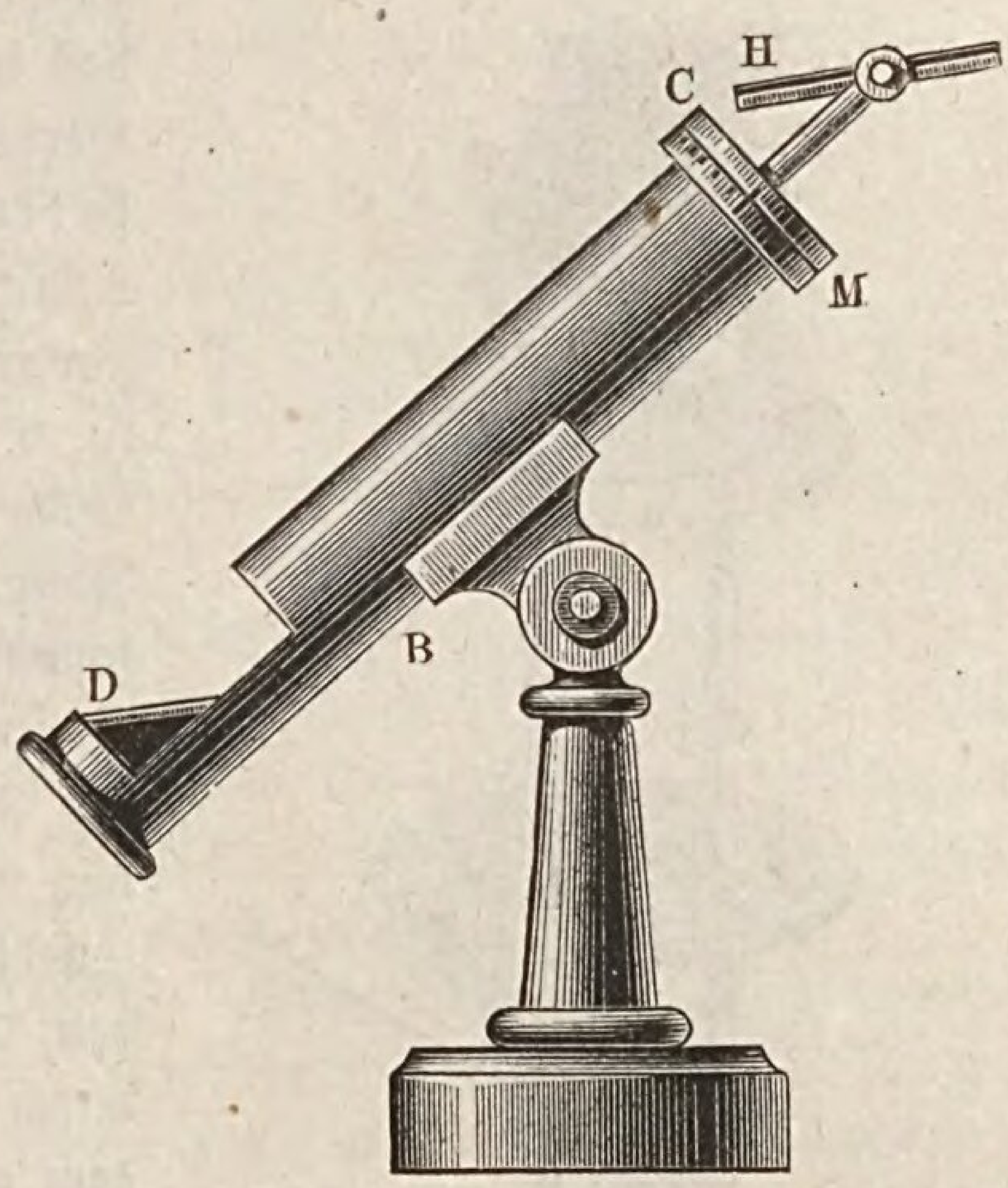


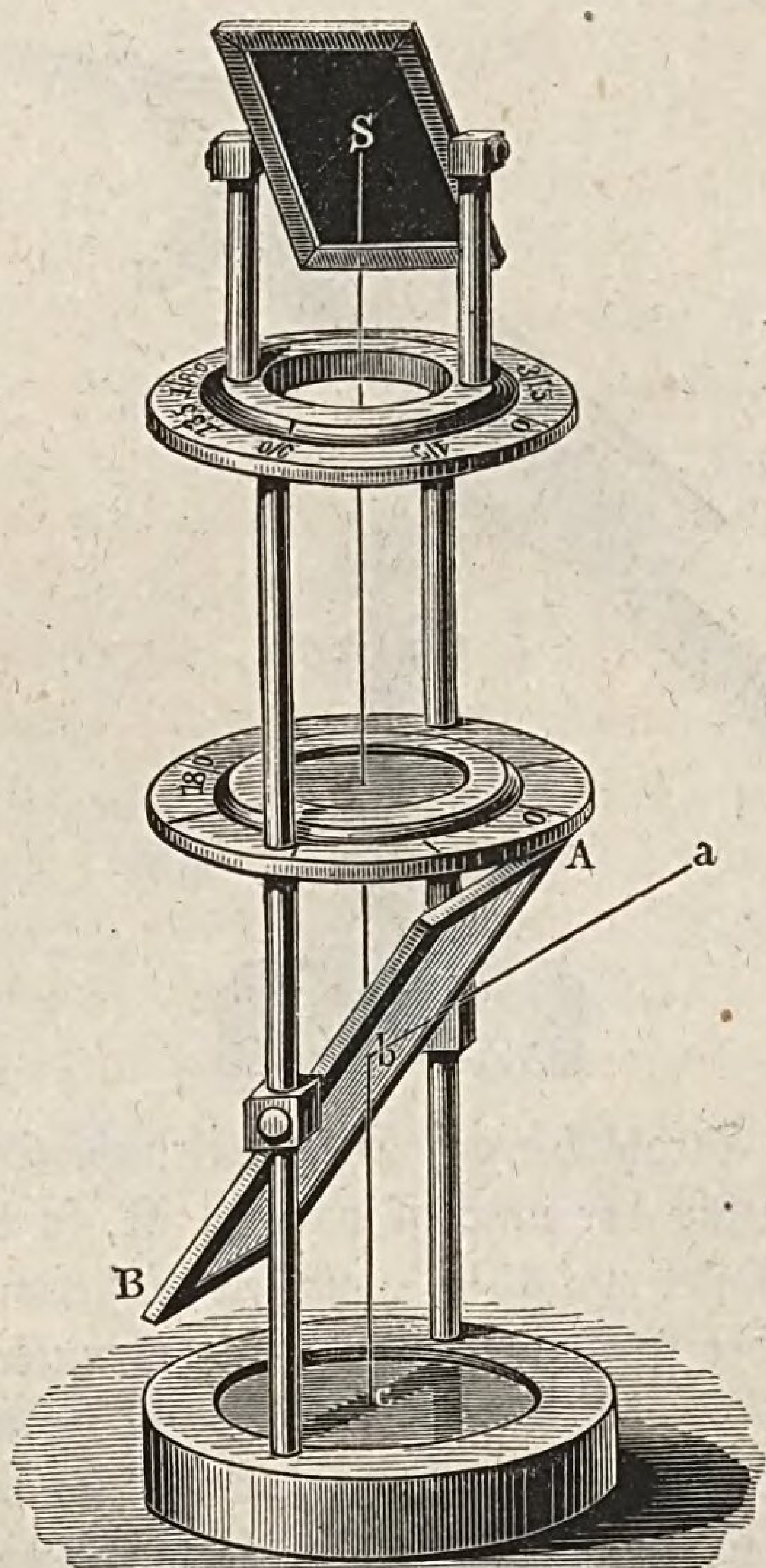
Fig. 359.



Fällt der durch Reflexion polarisierte Strahl *bc* auf eine zweite, ebenfalls auf der Rückseite geschwärzte Glastafel, welche der unteren parallel ist, so bildet der Strahl *bc* auch mit dieser einen Winkel von $35^1/_2{}^0$, und die Reflexionsebene *bcd* des oberen Spiegels fällt mit der Reflexionsebene *abc* des unteren zusammen. Bei dieser Lage des zweiten Spiegels wird der Strahl *bc* wie jeder gewöhnliche Lichtstrahl reflektiert. Dreht man jedoch den oberen Spiegel so, daß die Richtung des Strahles *bc* die Umdrehungsachse bildet, so bleibt zwar der Winkel, welchen der einfallende Strahl *bc* mit der Spiegelfläche macht, unverändert, allein der Parallelismus der beiden Spiegel hört auf, die Reflexionsebene des oberen Spiegels fällt nicht mehr mit der des unteren zusammen. Bei dieser Drehung nimmt die Intensität des zum zweiten Male reflektierten Strahles um so mehr ab, je mehr der Winkel wächst, den die Reflexionsebene des oberen Spiegels mit der des unteren macht, bis dieser Winkel 90^0 geworden ist, oder mit anderen Worten, bis die Reflexionsebenen beider Spiegel sich unter einem rechten Winkel schneiden. Bei dieser Stellung wird der Strahl *bc* von dem oberen Spiegel gar nicht mehr reflektiert, was doch der Fall sein müßte, wenn *bc* ein gewöhnlicher Lichtstrahl wäre. Bei weiter fortgesetzter

Drehung des oberen Spiegels nimmt die Intensität des reflektierten Lichtes allmählich wieder zu und erreicht wieder ihr Maximum, wenn die ganze Drehung 180° beträgt. In dieser Stellung fallen die Reflexionsebenen der beiden Spiegel abermals zusammen. Dreht man noch weiter, so wird der vom oberen Spiegel reflektierte Strahl wieder schwächer und verschwindet abermals ganz, wenn die Drehung 270° beträgt, also wenn die Reflexionsebenen beider Spiegel wieder rechtwinklig zu einander stehen. Bei noch weiter fortgesetzter Drehung nimmt die Intensität des reflektierten Lichtes wieder zu und erreicht wieder das anfängliche Maximum, wenn die Drehung des Spiegels 360° beträgt.

Fig. 360.



Eine Vorrichtung, an welcher zwei Polarisationsspiegel so angebracht sind, daß man damit den eben beschriebenen Versuch anstellen kann, heißt **Polarisationsapparat**. Die einfachste Einrichtung, welche man dem Polarisationsapparate geben kann, ist die Fig. 359 (a. v. S.) abgebildete. An dem einen Ende einer Röhre von Metall oder Pappe ist ein auf der Rückseite geschwärzter Spiegel *DB* so befestigt, daß er einen Winkel von $35^1/_2{}^0$ mit der Achse der Röhre bildet und also die Strahlen, welche in einem Winkel von $35^1/_2{}^0$ auf den Spiegel fallen, so reflektiert werden, daß sie in der Richtung dieser Achse durch die Röhre hindurchgehen. Auf dem anderen Ende der Röhre steckt eine Hülse *CM*, an welcher ein zweiter hinten geschwärzter Spiegel *HJ* befestigt ist, der ebenfalls einen Winkel von $35^1/_2{}^0$ mit der Achse der Röhre bildet; durch Umdrehung der Hülse wird auch der Spiegel mit umgedreht und kann durch diese Drehung in alle die Lagen gebracht werden, von denen eben die Rede war.

Die eben beschriebene Form des Polarisationsapparates ist unbequem; die zweckmäßigste Form desselben ist die in Fig. 360 in $^1/_4$ der natürlichen Größe dargestellte. In einem runden Fußgestelle, welches nicht zu leicht sein darf, damit der Apparat die nötige Stabilität besitze, befinden sich am Rande, diametral einander gegenüberstehend, zwei Stäbe, zwischen denen eine in ein Rähmchen *AB* gefaßte Platte von geschliffenem Spiegelglase angebracht ist, welche mittels zweier Zapfen um eine horizontale Achse gedreht werden kann, so daß man dem Spiegel jede beliebige Lage gegen die Richtung des Bleilotes

geben kann. Der Spiegel wird jedoch gewöhnlich in einer solchen Lage festgestellt, daß seine Ebene einen Winkel von $35^1/_2{}^0$ mit der Vertikalen macht. Fällt bei dieser Stellung des Spiegels ein Lichtstrahl ab in einem Winkel von $35^1/_2{}^0$ auf den Spiegel, so geht er zum Teil durch das Glas hindurch, und diesen Teil haben wir weiter nicht zu betrachten; zum Teil aber wird er in der Richtung bc vertikal nach unten reflektiert. Dieser reflektierte Strahl ist nun polarisiert; eine durch die Linien ab und bc gelegte Ebene heißt seine Polarisationsebene.

Auf dem Fußgestelle befindet sich in wagerechter Lage ein auf der Rückseite belegter Spiegel, den der polarisierte Strahl bc rechtwinklig trifft, so daß er in der Richtung cb zurückgeworfen wird und durch den Polarisationsspiegel hindurch zum oberen Teil des Apparates gelangt. Den mittleren Teil des Apparates bildet ein durch eine Glasplatte verschlossener Ring. Die oberen Enden der Stäbe tragen gleichfalls einen Ring, der aber in Grade eingeteilt ist. Der Nullpunkt dieser Teilung liegt so, daß, wenn man sich durch die Teilstriche 0 und 180° eine Vertikalebene gelegt denkt, diese Ebene mit der Reflexionsebene des unteren Spiegels, also auch mit der Polarisationsebene der durch den unteren Spiegel polarisierten Strahlen, zusammenfällt. In diesem geteilten Ringe ist ein anderer drehbar, auf welchem diametral gegenüberstehend zwei Säulchen angebracht sind, zwischen denen ein Spiegel s von schwarzem oder auf der Rückseite geschwärztem Glase ebenso befestigt ist, wie der untere Polarisationsspiegel zwischen den ihn tragenden Stäben; so wie nämlich dieser um eine horizontale Axe drehbar ist, so kann auch der Spiegel s leicht so gestellt werden, daß er einen Winkel von $35^1/_2{}^0$ mit der Vertikalen macht.

Der drehbare Ring, auf welchem die kleinen Säulchen stehen, ist am Rande etwas zugeschärft, und gerade in der Mitte der vorderen Hälfte des Ringes ist eine Linie, ein Index, auf die Zuschärfung gezogen. Eine durch diesen Index und den Mittelpunkt des Ringes gelegte Vertikalebene fällt mit der Reflexionsebene des oberen Spiegels zusammen. Dreht man den Ring, welcher diesen Spiegel trägt, bis der Index mit dem Nullpunkte der Teilung zusammenfällt, so fallen auch die Reflexionsebenen des oberen und des unteren Spiegels zusammen. Dasselbe ist der Fall, wenn der Index bei 180° steht. Wenn der Index bei 90° (wie in unserer Figur) oder bei 270° steht, so macht die Reflexionsebene des oberen Spiegels einen rechten Winkel mit der Reflexionsebene des unteren Polarisationsspiegels.

Die Erscheinungen der gewöhnlichen Polarisation, welche man an diesem Apparate beobachten kann, sind folgende: Wenn beide Spiegel parallel stehen, wenn also der Index des den schwarzen Spiegel s tragenden Ringes bei 0° steht, so reflektiert der obere Spiegel die von unten her ihn treffenden Strahlen; das Gesichtsfeld ist also hell. Dreht man aber den Zerlegungsspiegel (so wird gewöhnlich der obere Spiegel genannt) aus dieser Lage heraus, so nimmt die Intensität des durch ihn reflektierten Lichtes mehr und mehr ab und wird Null, wenn der Index bei 90° steht. In dieser Stellung reflektiert der schwarze Spiegel die von unten her ihn treffenden Strahlen nicht mehr; das Gesichtsfeld

erscheint dunkel. Dreht man noch weiter, so wird es allmählich wieder heller, und wenn der Index bei 180° steht, ist die Lichtstärke wieder derjenigen gleich, die bei 0° beobachtet wurde. Das Licht nimmt jedoch wieder ab, wenn man noch über 180° hinaus dreht; das Gesichtsfeld wird zum zweiten Male dunkel, wenn der Index bei 270° steht.

Es versteht sich von selbst, daß während dieser ganzen Drehung die Richtung des schwarzen Spiegels gegen die Vertikale unverändert bleiben muß. In allen Lagen macht der obere Spiegel einen Winkel von $35\frac{1}{2}$° mit der Vertikalen.

Giebt man, ohne sonst etwas an dem Apparate zu ändern, dem unteren Spiegel eine andere Stellung gegen die einfallenden Strahlen, stellt man ihn z. B. so, daß er einen Winkel von 25° mit der Vertikalen macht, so werden solche Strahlen zum oberen Spiegel des Apparates gelangen, die den unteren Polarisationsspiegel unter einem Winkel von 25° getroffen haben. Wiederholt man nun die oben beschriebenen Versuche, so zeigt sich, daß das von dem oberen Spiegel zurückgeworfene Licht nie ganz Null wird. Wenn der obere Spiegel so gestellt ist, daß seine Reflexionsebene die des unteren kreuzt, wenn also der Index der oberen Teilung bei 90° steht, so wird er in dieser Stellung freilich weniger Licht reflektieren als in jeder anderen, doch wird immer noch ein Teil der von unten kommenden Strahlen reflektiert.

Es läßt sich daraus schließen, daß die unter einem Winkel von 25° vom unteren Polarisationsspiegel reflektierten Strahlen zwar zum Teil, aber doch nicht vollständig polarisiert sind. Je mehr der Winkel, welchen die auf den unteren Glasspiegel fallenden Strahlen mit der Ebene dieses Spiegels machen, von $35\frac{1}{2}$° abweicht, desto unvollständiger ist die Polarisation. Der Winkel, für welchen die vollständige Polarisation stattfindet, heißt Polarisationswinkel. Derselbe ist für verschiedene Substanzen verschieden; für Glas ist er $35\frac{1}{2}$°.

Metallflächen haben die Eigenschaft nicht, das Licht durch Reflexion zu polarisieren; man kann deshalb auch Spiegel, welche auf der Rückseite mit Zinn und Quecksilber belegt sind, nicht zu Polarisationsspiegeln gebrauchen.

Nimmt man von dem Polarisationsapparate den Zerlegungsspiegel weg und ersetzt man ihn durch eine horizontal gehaltene Turmalinplatte, deren Flächen der krystallographischen Hauptaxe dieses Minerals parallel geschliffen sind, so gewahrt man an dem durch die Platte hindurchgegangenen Lichte ganz ähnliche Erscheinungen wie diejenigen, welche man an dem vom Zerlegungsspiegel s reflektierten Lichte beobachtete. Hat die Platte eine solche Stellung, daß ihre krystallographische Hauptaxe rechtwinklig auf der Polarisationsebene der einfallenden Strahlen steht, so läßt sie die Strahlen so vollständig hindurch, als es die Färbung des Minerals erlaubt. Macht aber die Axe der Platte einen anderen Winkel mit der Polarisationsebene der einfallenden Strahlen, so ist das durchgehende Licht um so schwächer, je kleiner dieser Winkel wird. Fällt die Axe der Platte in die Polarisationsebene der einfallenden Strahlen, so ist die Intensität des durchgegangenen Lichtes ein Minimum, und falls die Platte dick genug ist, vollständig Null. Die Lage des Krystalls, bei welcher dessen

Axe mit der Polarisationsebene der einfallenden Strahlen einen rechten Winkel bildet, entspricht dem Falle, daß der obere Spiegel dem unteren parallel ist, die zuletzt erwähnte Stellung des Krystalls aber dem Falle, wo die Spiegel gekreuzt sind.

Aus den erwähnten Versuchen läßt sich schließen, daß, wenn gewöhnliches Licht auf eine solche Turmalinplatte fällt, es nach seinem Durchgange durch dieselbe polarisiert sein wird. Legt man demnach zwei parallel mit der Axe geschnittene Turmalinplatten so aufeinander, daß ihre Axen parallel sind, so werden sie einfallendes gewöhnliches Licht ebenso gut durchlassen wie eine Platte,

Fig. 364.

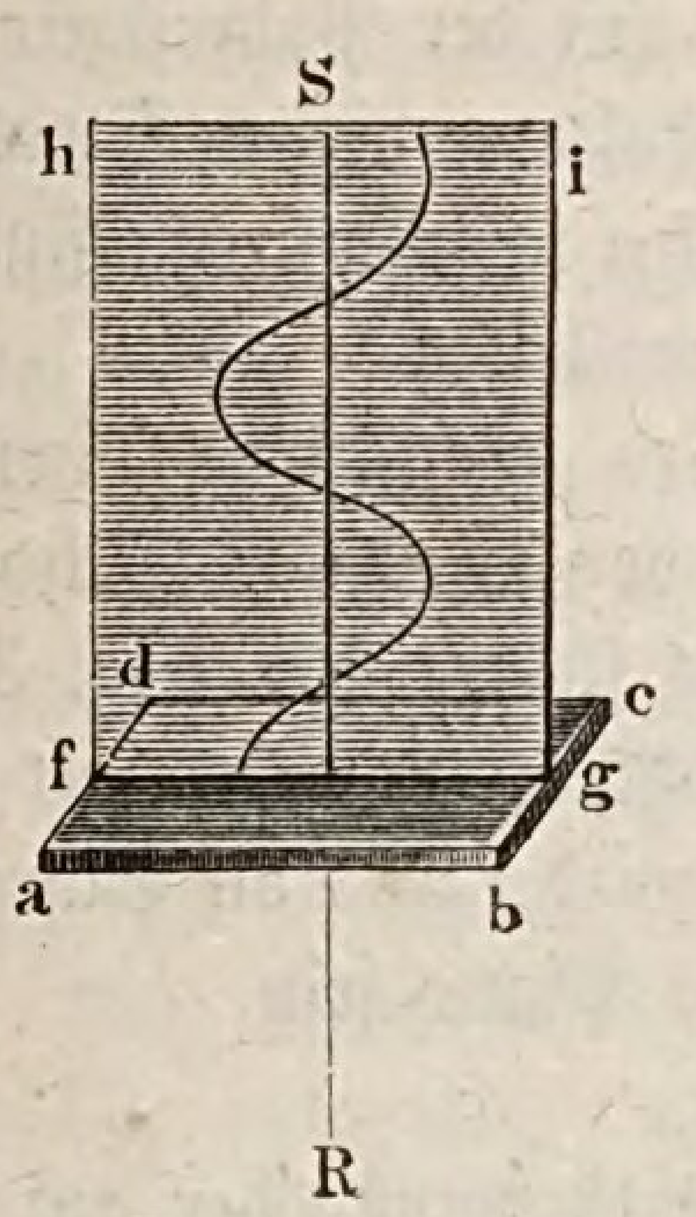


Fig. 361.

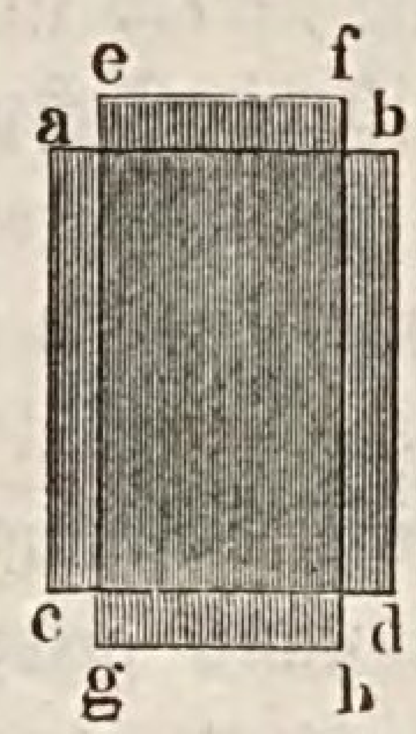


Fig. 362b.

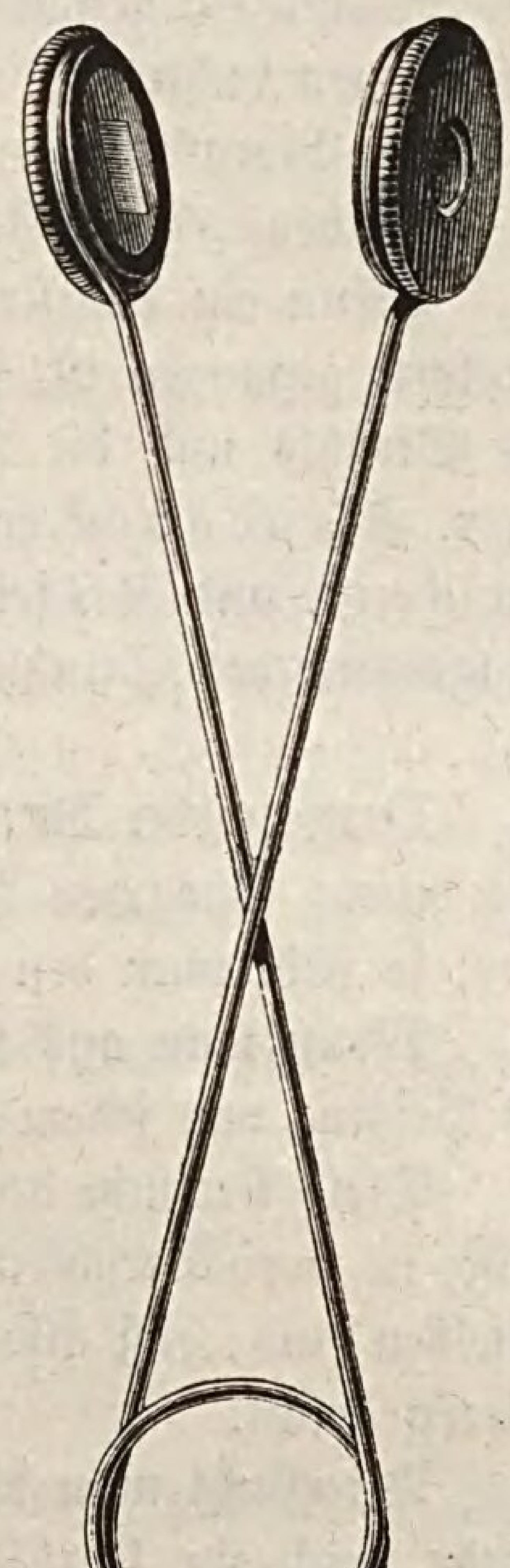


Fig. 362a.

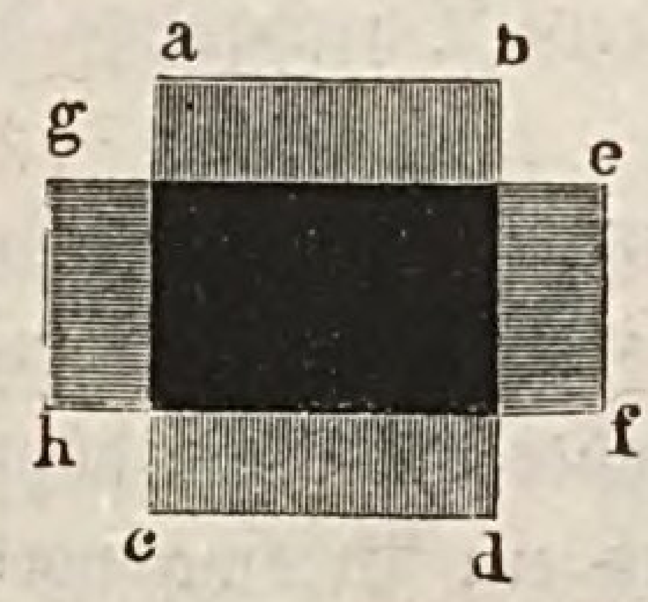
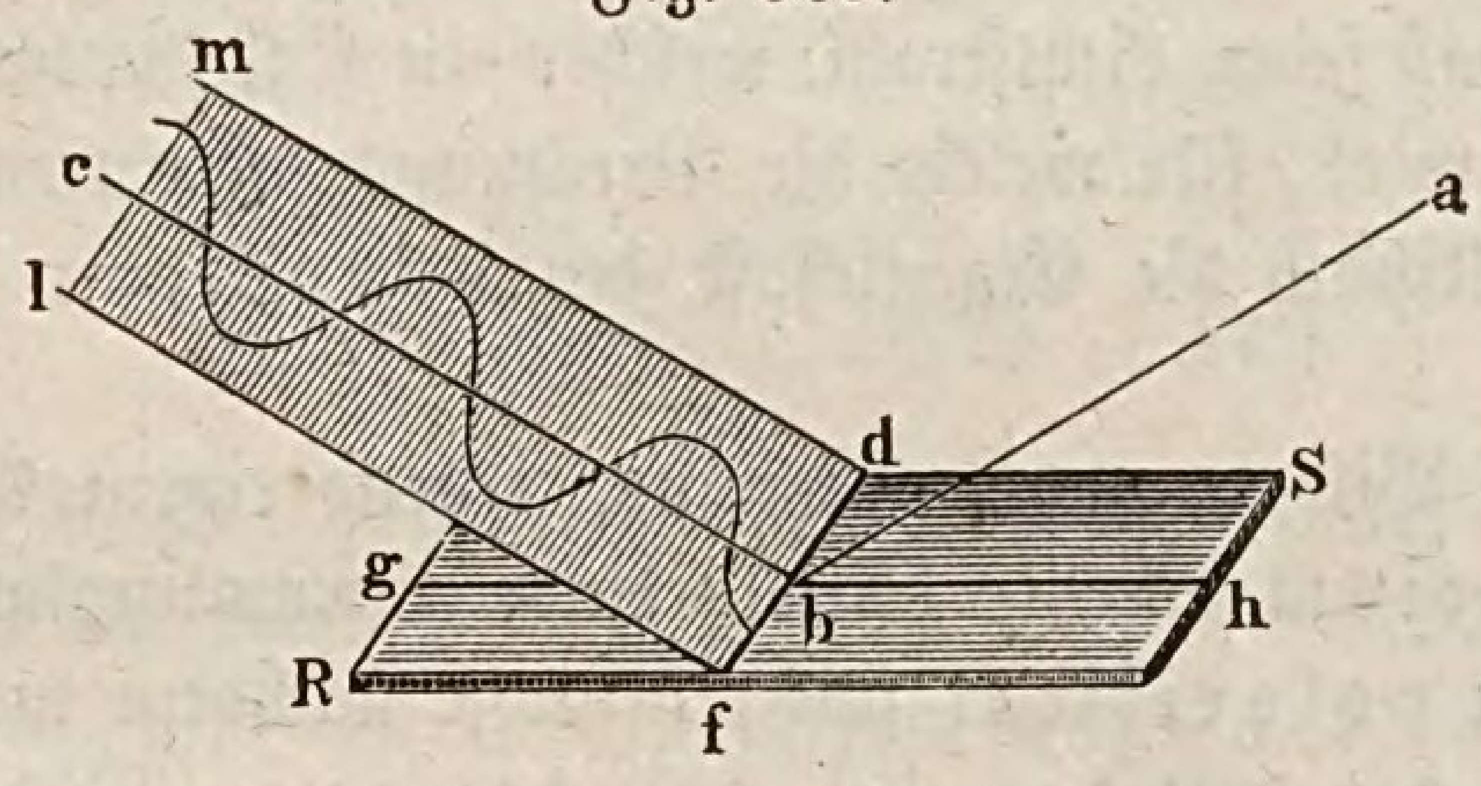


Fig. 363.



welche so dick ist als beide zusammengenommen, wie Fig. 361 andeutet, wo *abcd* die eine und *efgh* die andere Platte bezeichnet. Die Schraffierung soll den krystallographischen Axen parallel sein. Dreht man aber die eine Platte in ihrer Ebene herum, ohne die Lage der zweiten zu ändern, so wird das durchgelassene Licht schwächer und schwächer, bis es endlich ganz verschwindet, wenn die Axen beider Platten einen rechten Winkel mit einander machen, wie dies Fig. 362a veranschaulicht. Zwei solcher Platten, welche in entsprechender Fassung so in einer Drahtzange Fig. 362b befestigt sind, daß man jede in ihrer Ebene umdrehen kann, bilden also einen kleinen Polarisationsapparat, welcher unter dem Namen der Turmalinzange bekannt ist.

Nach der Vibrationstheorie erklärt man die Polarisation des Lichtes durch die Annahme, daß die Schwingungen eines polarisierten Lichtstrahls in einer und derselben Ebene stattfinden, während die Schwingungen eines gewöhnlichen Lichtstrahls nach allen möglichen, zum Strahle senkrechten Richtungen, vor sich gehen.

Die Schwingungen eines durch Reflexion polarisierten Strahls sind mit der Ebene des Spiegels parallel, wie dies Fig. 363 (a. v. S.) anschaulich machen soll. *RS* sei der Spiegel, *ab* der einfallende, *bc* der reflektierte und durch die Reflexion polarisierte Strahl, dann wird die durch *ac* und *bc* gelegte Ebene, welche die Ebene des Spiegels in *gh* schneidet, die Polarisationsebene des Strahls *bc* genannt; die Ebene *fdlm* aber, welche mit der Polarisationsebene einen rechten Winkel bildet, ist die Schwingungsebene dieses Strahls, d. h. die Vibrationen, welche den polarisierten Strahl *bc* fortpflanzen, finden in der Ebene *fdlm* statt, und zwar sind sie mit *fd* parallel.

Wenn ein Lichtstrahl durch eine parallel mit der Axe geschnittene Turmalinplatte gegangen ist, so finden seine Schwingungen in der durch die Richtung des Strahls und die Axe des Krystalls gelegten Ebene statt. In Fig. 364 (a. v. S.) sei *abcd* eine Turmalinplatte, deren Axenrichtung parallel mit *ab* und *dc* ist, und *RS* sei die Richtung des Strahls, dann wird *fghi* die Schwingungsebene des Strahls nach dem Durchgange durch die Platte sein.

174 **Doppelte Brechung.** Legt man ein Kalkspathrhomboëder auf ein mit einem schwarzen Punkte oder einer schwarzen Linie versehenes Stück Papier, so sieht man den Punkt oder die Linie doppelt.

Wenn man aus Kalkspath ein Prisma verfertigt, so sieht man durch dieses Prisma von jedem Gegenstande zwei Bilder.

Diese Versuche beweisen, daß jeder Lichtstrahl, welcher ein Kalkspathprisma trifft, in zwei Strahlen zerlegt wird, für welche die Brechungsexponenten nicht dieselben sind, daß also der Kalkspath die Eigenschaft der doppelten Brechung besitzt.

Untersucht man die beiden Bilder, welche man von irgend einem Gegenstande durch ein Kalkspathprisma sieht, mittels einer Turmalinplatte, so findet man, daß beide Strahlen polarisiert sind, denn je nachdem man die Turmalinplatte dreht, verschwindet bald das eine, bald das andere Bild, und zwar ist die Ebene, in welcher die Schwingungen des einen Strahls stattfinden, rechtwinklig zur Schwingungsebene des anderen Strahls.

Denken wir uns durch die Richtung des Strahls, welcher durch ein Stück Kalkspath hindurch geht und durch die Richtung seiner krystallographischen Hauptaxe eine Ebene gelegt, so ist dies der Hauptschnitt für den fraglichen Strahl. Die Schwingungen, welche einen Strahl im Krystall fortpflanzen, sind nun entweder rechtwinklig zum Hauptschnitt, oder sie fallen in die Ebene des Hauptschnitts.

Für einen rechtwinklig zum Hauptschnitt vibrierenden Strahl ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, also auch der Brechungsexponent (1,654) stets der-

selbe, welches übrigens auch seine Richtung im Krystall sein mag, weshalb denn auch jeder rechtwinklig zum Hauptschnitt vibrierende Strahl als ordinärer Strahl bezeichnet wird.

Für einen in der Ebene des Hauptschnitts vibrierenden Strahl dagegen ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, also auch der Brechungsexponent veränderlich; die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist am größten, der Brechungsexponent also am kleinsten (1,483) für Strahlen, welche rechtwinklig zur krystallographischen Hauptaxe den Krystall durchlaufen; je mehr die Richtung des Strahles sich der Richtung der krystallographischen Hauptaxe nähert, desto mehr nähert sich der Brechungsexponent dem Werte 1,654.

Solche Strahlen, deren Vibrationsrichtung in der Ebene des Hauptschnitts liegt, werden extraordinäre Strahlen genannt. Für die Richtung der krystallographischen Hauptaxe ist der Brechungsexponent der extraordinären Strahlen dem der ordinären Strahlen gleich; in der Richtung der krystallographischen Hauptaxe des Kalkspaths findet also keine doppelte Brechung statt, weshalb diese Richtung auch als die optische Axe des Krystalls bezeichnet wird.

Die Krystalle des regulären Krystallsystems haben keine doppelte Brechung; die Krystalle sämtlicher übrigen Krystallsysteme sind doppeltbrechend.

Alle Krystalle des tetragonalen und des hexagonalen Krystallsystems sind optisch einaxig, wie der Kalkspath, und zwar fällt die optische Axe stets mit der krystallographischen Hauptaxe zusammen. Jenachdem der Brechungsexponent der ordinären oder der extraordinären Strahlen am größten ist, heißen sie negative oder positive Krystalle.

Für die rechtwinklig zur optischen Axe durch den Krystall hindurchgehenden Strahlen ist der Brechungsexponent

	der ordinären	der extraordinären
für Kalkspath	1,654	1,483
für Bergkrystall	1,548	1,558

Kalkspath ist also ein optisch negativer, Quarz ist ein optisch positiver Krystall.

Man nennt einen Krystall stark doppeltbrechend, wenn die Differenz zwischen den Brechungsexponenten der ordinären und der extraordinären Strahlen bedeutend ist, wie z. B. beim Kalkspath. Quarz ist ein schwach doppeltbrechender Krystall.

Zur Erklärung der doppelten Brechung in einaxigen Krystallen muß man annehmen, daß die Dichtigkeit des Äthers in der Richtung der optischen Axe ein Minimum oder Maximum, daß sie aber nach allen rechtwinklig zur Hauptaxe stehenden Richtungen dieselbe ist. — Für alle Krystalle, welche zu den drei letzten Krystallsystemen gehören, ist die Dichtigkeit des Äthers nach den drei krystallographischen Axen verschieden, und infolge dessen haben sie, wie hier nicht näher entwickelt werden kann, zwei optische Axen, d. h. es giebt in ihnen zwei Richtungen, nach welchen sich alle Strahlen mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen.

175 **Chromatische Polarisation.** Blättchen doppeltbrechender Krystalle zeigen im polarisierten Lichte Farbenerscheinungen, die man als chromatische Polarisation bezeichnet; sie zeigen sich am einfachsten in dünn gespaltenen Gypsblättchen.

Nehmen wir an, die Spiegel des Polarisationsapparates seien gekreuzt, d. h. der obere Spiegel sei so gestellt, wie es Fig. 360 zeigt. Legt man nun ein dünnes Blättchen von krystallisiertem Gyps auf das mittlere Tischchen, so erscheint es im allgemeinen gefärbt; dreht man das Tischchen in horizontaler Ebene um eine vertikale Drehungsaxe, so wird die Färbung heller oder dunkler, ohne daß sich die Farbe der Art nach ändert. Bei fortgesetztem Drehen kommt das Gypsblättchen bald in eine Lage, wo seine Farbe ganz verschwindet und das ganze Gesichtsfeld gerade so dunkel erscheint, als ob das Gypsblättchen gar nicht da wäre. Hat man das Gypsblättchen in diese Lage gebracht, so ritze man auf seiner Oberfläche eine Linie ein, deren Richtung parallel läuft mit der Linie, welche den Nullpunkt der Teilung mit dem Teilstrich 180° verbindet, also eine Linie, welche den Durchschnitt der Ebene des Gypsblättchens mit der Reflexionsebene des unteren Spiegels bezeichnet. Eine zweite Linie ritze man auf das Gypsblättchen rechtwinklig zur ersteren.

Diese beiden Linien bezeichnen nun die Lage der Schwingungsebenen der beiden Strahlen, in welche ein Lichtstrahl geteilt wird, der das Gypsblättchen trifft. Wenn der einfallende Strahl rechtwinklig auf die Ebene des Gypsblättchens auftrifft, so werden die beiden Strahlen zwar nicht der Richtung nach auseinandergehen, aber sie pflanzen sich mit ungleicher Geschwindigkeit durch den Krystall fort, weil die Elasticität des Äthers nach der Richtung der beiden Schwingungsebenen nicht gleich ist.

Dreht man das Gypsblättchen aus der Lage heraus, in welcher es ganz dunkel erscheint, so wird es heller und heller, und seine Farbe erhält den größten Glanz, wenn die beiden Schwingungsebenen des Gypsblättchens einen Winkel von 45° mit der Schwingungsebene des unteren Spiegels machen.

Läßt man das Blättchen nun in dieser Lage, während man den oberen Spiegel dreht, so wird die Farbe des Blättchens blasser und blasser (nicht dunkler), bis es endlich ganz farblos erscheint, wenn die Reflexionsebene des oberen Spiegels einen Winkel von 45° mit der des unteren macht, wenn also die Reflexionsebene des oberen Spiegels mit der einen Schwingungsebene des Gypsblättchens zusammenfällt. Dreht man den oberen Spiegel noch weiter, so geht die Farbe des Gypsblättchens in die komplementäre von derjenigen über, die man vorher beobachtete, und diese komplementäre Farbe wird am lebhaftesten, wenn die Reflexionsebene des oberen Spiegels mit der des unteren zusammenfällt.

Die Erklärung dieser Erscheinung kann hier nur angedeutet, aber nicht ausgeführt werden.

Der von dem unteren Polarisationsspiegel kommende Strahl wird nämlich bei seinem Eintritt in das Gypsblättchen in zwei Strahlen gespalten, die zwar der Richtung nach nicht auseinandertreten, aber doch den Krystall mit ungleicher

Geschwindigkeit durchlaufen, so daß der eine dem anderen voraneilt. Wenn nun diese beiden Strahlen durch den Zerlegungsspiegel auf eine und dieselbe Schwingungsebene reduziert werden, so können sie interferieren. Die Farben entstehen also hier nach ähnlichen Gesetzen, wie die Farben der Newton'schen Ringe, die Farbe des Blättchens hängt also natürlich auch von seiner Dicke ab.

Der Gyps ist ein zweiaxiger Krystall, dessen Hauptspaltungsfläche mit der Ebene der beiden optischen Axen parallel ist. Ähnliche Erscheinungen, wie die oben besprochenen, beobachtet man auch bei dünnen Blättchen anderer parallel mit den optischen Axen geschliffenen Krystallblättchen.

Eigentümliche Farbenringe beobachtet man in senkrecht zur optischen Axe geschliffenen Krystallplatten, wenn sie zwischen die beiden Platten der Turmalinzange eingelegt sind. Näheres darüber im Lehrbuch.

Cirkularpolarisation. Eine ganz eigentümliche Erscheinung 176 bietet der Bergkrystall dar. Legt man auf den Tisch des Polarisationsapparates eine senkrecht zur Axe geschnittene Quarzplatte, so erscheint ihr Bild in dem oberen Spiegel lebhaft gefärbt, und zwar ändert sich die Farbe, wenn der Zerlegungsspiegel gedreht wird, während eine Drehung der Quarzplatte keine Änderung in der Farbe hervorbringt. Wie man auch den Zerlegungsspiegel drehen mag, so erscheint doch die Platte niemals ganz farblos hell oder ganz dunkel, wie es bei Gypsblättchen beobachtet wird.

Um diese Erscheinung in ihrer größten Einfachheit kennen zu lernen, muß man einfarbiges Licht anwenden, was am einfachsten dadurch bewerkstelligt wird, daß man durch ein rotes Glas sieht.

Erscheint die Quarzplatte zwischen den gekreuzten Spiegeln des Polarisationsapparates durch das rote Glas hindurch hell, so wird man es durch Drehen des Zerlegungsspiegels nach der rechten oder nach der linken Seite bald dahin bringen, daß das Gesichtsfeld ganz so dunkel ist, wie es zwischen gekreuzten Spiegeln ohne die Quarzplatte sein würde, kurz, die Polarisationsebene der von unten kommenden Strahlen erscheint durch die Quarzplatte nach der rechten oder linken Seite gedreht.

Die Größe der Drehung hängt von der Dicke der Platte ab und ist dieser proportional. Eine Quarzplatte von 1 mm Dicke dreht die Polarisationsebene der roten Strahlen um 19^0.

Für die brechbareren Strahlen ist die Drehung der Polarisationsebene durch dieselbe Quarzplatte größer, und zwar: für Gelb 23^0, für Grün 28^0, für Blau 32^0, für Violett 41^0. Aus der ungleichen Drehung, welche die Polarisationsebene verschiedener Strahlen in derselben Quarzplatte erleidet, erklärt es sich auch, weshalb sie bei Anwendung von weißem Lichte für keine Stellung des Zerlegungsspiegels ganz farblos hell oder ganz dunkel erscheint.

Jenachdem eine Quarzplatte die Polarisationsebene nach der rechten oder nach der linken Seite dreht, nennt man sie rechts- oder linksdrehend.

Diese eigentümliche Erscheinung, welche senkrecht auf die Axe geschliffene Quarzplatten zeigen, wird mit dem Namen der Cirkularpolarisation bezeichnet.

Auch bei Flüssigkeiten hat man die Erscheinung der Cirkularpolarisation nachgewiesen.

Um die Cirkularpolarisation in Flüssigkeiten zu beobachten, gießt man sie in eine oben offene, am Boden durch eine ebene Glasplatte geschlossene Röhre von 20 bis 30 cm Höhe und stellt diese auf den Tisch des Polarisationsapparates.

Rechtsdrehende Flüssigkeiten sind unter anderen Citronenöl, Zuckersirup, Auflösung von Kampfer in Weingeist, deutsches und amerikanisches Terpentinöl. Linksdrehende sind dagegen französisches Terpentinöl, Kirschlorbeerwasser u. s. w.

Die Drehung der Polarisationsebene durch Flüssigkeiten ist ungleich geringer als beim Bergkrystall; um dieselbe Größe der Drehung hervorzubringen wie eine Quarzplatte, muß eine Säule von Citronenöl 34=, eine Säule von Terpentinöl 68mal so hoch sein wie die Quarzplatte; man muß deshalb schon ziemlich lange Säulen der Flüssigkeiten anwenden, wenn die Erscheinungen der Cirkularpolarisation recht deutlich hervortreten sollen.

Man hat besondere Apparate zur Untersuchung der Cirkularpolarisation in Flüssigkeiten konstruiert, bei welchen die Röhre horizontal liegt und an beiden Enden durch ebene Glasplatten geschlossen ist. Die Polarisationsspiegel sind durch sogenannte Nicol'sche Prismen ersetzt; es sind dies Kalkspathprismen, welche durch eine besondere Konstruktion nur ein polarisiertes Bild geben, also nur Licht durchlassen, welches in einer bestimmten Schwingungsebene vibriert. Ein Nicol'sches Prisma wirkt also ebenso wie ein Polarisationsspiegel oder wie eine Turmalinplatte.

Auch eine praktische Anwendung hat man von der Cirkularpolarisation gemacht: eine Säule von Zuckersirup von bestimmter Länge wird nämlich die Polarisationsebene um so stärker drehen, je konzentrierter die Lösung ist; die Drehung der Polarisationsebene ist also ein Mittel, den Konzentrationsgrad einer Zuckerlösung zu erkennen. Die auf die Cirkularpolarisation sich gründenden Apparate zur Bestimmung des Zuckergehaltes einer Lösung werden Saccharometer genannt.

Siebentes Kapitel.

Chemische Wirkungen des Lichtes.

Einfluss des Lichtes auf chemische Prozesse. In den 177
Lehrbüchern der Chemie werden eine Menge von Beispielen angeführt, welche den Einfluß des Lichtes auf chemische Prozesse beweisen; es sollen deshalb hier nur einige der auffallendsten erwähnt werden. Bei gewöhnlicher Temperatur verbinden sich im Dunklen Chlorgas und Wasserstoffgas nicht mit einander; sobald man aber dem Lichte den Zutritt gestattet, geht die Verbindung vor sich, und zwar langsam im Tageslichte, unter Explosion im Sonnenlichte. — Das im Wasser absorbierte Chlorgas verbindet sich unter Einwirkung des Sonnenlichtes allmählich mit dem Wasserstoffe des Wassers zu Salzsäure, während Sauerstoff frei wird. — Phosphor, welcher in Wasser aufbewahrt wird, verwandelt sich im Sonnenlichte in rotes Phosphoroxyd. — Konzentrierte Salpetersäure zersetzt sich am Sonnenlichte schon bei gewöhnlicher Temperatur zum Teil in Sauerstoff und Untersalpetersäure. — Das weiße Chlorsilber wird durch das Licht geschwärzt, was eine Folge seiner Zersetzung ist, indem das Chlor entweicht und das Silber metallisch in fein verteiltem Zustande zurückbleibt.

Sehr auffallend ist der Einfluß des Lichtes auf die Zersetzung organischer Substanzen; es befördert nämlich die Vereinigung des Sauerstoffs der Atmosphäre mit dem Kohlenstoff und dem Wasserstoff der organischen Körper. Hieraus erklärt sich denn auch das Bleichen vegetabilischer Farbstoffe im Lichte, namentlich im Sonnenlichte, das Gelbwerden des Terpentinöls, das Grünwerden des gelben Guajaks, wenn eine weingeistige Lösung desselben, auf Papier gestrichen, dem Lichte ausgesetzt wird.

Zum Gedeihen der lebenden Pflanzen ist das Licht durchaus nötig; im Dunklen ist eine kräftige Entwickelung derselben unmöglich; sie erhalten bald ein verkümmertes Ansehen, Blätter und Blüten bleiben blaß. Pflanzen, die in Zimmern gezogen werden, wachsen bekanntlich immer nach den Fenstern hin.

Die grünen Teile der Pflanzen absorbieren Kohlensäure aus der Luft; diese Kohlensäure wird zerlegt, der Kohlenstoff bleibt als Bestandteil der Pflanze zurück, während der Sauerstoff wieder in die Atmosphäre ausgehaucht wird. Die Zersetzung der Kohlensäure und das Aushauchen von Sauerstoff in die Luft findet aber nur unter dem Einflusse des Lichtes statt. Man kann sich leicht davon überzeugen, wenn man einen frischen grünen Zweig unter eine mit kohlensäurehaltigem Wasser gefüllte Glasglocke bringt; im Lichte entwickeln sich zahlreiche Gasblasen an den Blättern, die in den oberen Teil der Glasglocke aufsteigen; das hier gesammelte Gas enthält Sauerstoffgas. Diese Gasentwickelung findet im Dunklen nicht statt und hört auch auf, wenn dem Wasser alle freie Kohlensäure entzogen wird.

Im allgemeinen ist die chemische Wirkung der blauen und violetten Strahlen stärker als die der roten und gelben.

178 **Photographie.** Schon Wedgwood kam (1801) auf den Gedanken, die Schwärzung des Chlorsilbers zu benutzen, um die Bilder der Camera obscura zu fixieren, und in der That stellte Davy (1801) mittels eines Sonnenmikroskops die Bilder kleiner Gegenstände auf Chlorsilberpapier dar; sie wurden aber bald durch die fortdauernde Einwirkung des Lichtes auf das Chlorsilber wieder vernichtet. Niepce brachte (1814) es in der Kunst, solche Lichtbilder zu fixieren, schon weiter; allein erst Daguerre machte (1839) nach vielen mühsamen Versuchen einen wesentlichen Fortschritt.

Das Material, auf welchem die Daguerre'schen Lichtbilder dargestellt werden, ist eine plattierte, d. h. eine mit einer dünnen Silberschicht überzogene Kupferplatte. Nachdem sie gehörig gereinigt worden ist, wird sie auf eine viereckige Porzellanschale gelegt, welche eine wässerige Lösung von Chlorjod enthält, und hier so lange den Dämpfen des Jodes ausgesetzt, bis sich eine goldgelbe oder violette Schicht von Jodsilber auf der Platte gebildet hat. Nun wird die Platte, vor jeder fremden Einwirkung des Lichtes geschützt, genau an der Stelle in die Camera obscura eingesetzt, an welcher ein scharfes Bild des abzubildenden Gegenstandes entsteht. Nach einiger Zeit, deren Dauer von mannigfachen Umständen abhängt, aber noch ehe man die Spur eines Bildes wahrnehmen kann, wird die Platte aus der Camera obscura wieder weggenommen und in einen Kasten gebracht, in welchem Quecksilberdämpfe entwickelt werden. Unter dem Einfluß dieser Dämpfe wird das Bild alsbald sichtbar. Sobald dasselbe hinlänglich ausgeprägt ist, wird die Platte in eine Lösung von unterschwefligsaurem Natrium gelegt, wodurch der Überzug von Jodsilber aufgelöst und so eine fernere Einwirkung des Lichtes unmöglich gemacht wird.

Diese letztere Operation wird mit dem Namen des Fixierens bezeichnet. Es versteht sich von selbst, daß die aus der Camera obscura genommene Platte so lange vor der Einwirkung des Tageslichtes geschützt werden muß, bis das Bild fixiert ist.

An den Stellen der jodierten Platte, auf welche die hellen Partieen des Bildes der Camera obscura gefallen waren, hat das Licht schon eine Einwirkung

hervorgebracht, bevor dieselbe dem Auge sichtbar wird; diejenigen Stellen der Platte nämlich, welche dem Lichte am meisten ausgesetzt waren, haben die Eigenschaft erhalten, Quecksilberdämpfe zu kondensieren; hier schlägt sich also Quecksilber in unendlich feinen Perlchen nieder, während da, wo das Licht nicht eingewirkt hat, kein solcher Niederschlag stattfindet. Nachdem nun an den letzteren Stellen das völlig unveränderte Silberjodid abgewaschen worden ist, hat man an den hellen Partieen des Bildes den feinen Quecksilberstaub; da, wo das Licht nicht eingewirkt hat, den glänzenden Silberspiegel; und wenn man die Platte so hält, daß der Spiegel solche Strahlen in das Auge reflektiert, welche von dunklen Gegenständen kommen, so bildet dieser Silberspiegel den dunklen Grund, auf welchem die hellen Partieen durch das von den Quecksilberkügelchen nach allen Seiten hin zerstreute Licht hervortreten.

Eine andere von Talbot (1839) angestrebte Methode, Lichtbilder herzustellen, welche vorzugsweise als Photographieen bezeichnet werden, besteht im wesentlichen darin, daß zunächst ein negatives Bild auf einer durchsichtigen oder durchscheinenden Substanz hergestellt und von diesem negativen Bild eine positive Kopie auf Chlorsilberpapier gemacht wird.

Das negative Bild wird seit 1852 in der Regel auf Glas dargestellt und zwar auf folgende Weise: Die Glasplatte wird mit Kollodium, einer Auflösung von Schießbaumwolle in Äther, übergossen, welchem eine bestimmte Quantität Alkohol zugesetzt und in welchem etwas Jodkalium aufgelöst ist. Nachdem die Kollodiumschicht gleichförmig über die Platte ausgebreitet ist, läßt man das Überflüssige ablaufen und taucht dann die Platte in das sogenannte Silberbad, d. h. in eine wässerige Lösung von salpetersaurem Silber.

Das salpetersaure Silber durchdringt nun die Kollodiumschicht, und verwandelt das Jodkalium in Jodsilber, welches nebst einem Überschuß von salpetersaurem Silber durch die ganze Kollodiumschicht gleichförmig verteilt ist und die lichtempfindliche Schicht bildet.

Die so präparierte Platte wird nun in die Camera obscura gesetzt, aber schon nach kurzer Zeit herausgenommen, ehe noch durch das Licht direkt eine Reduktion des Jodsilbers bewirkt ist. An Stellen, wo das Licht eingewirkt hat, ist aber nun das Jodsilber leichter reduzierbar, als an solchen Stellen, wo das Licht nicht einwirkte, so daß, wenn man auf die aus der Camera obscura herausgenommene Platte eine reduzierende Flüssigkeit gießt, wozu man gewöhnlich Pyrogallussäure oder eine Lösung von Eisenvitriol wählt, an den dem Lichte ausgesetzt gewesenen Stellen rasch eine Reduktion des Silbers, also eine Schwärzung erfolgt, während an den nicht vom Lichte getroffenen Stellen die empfindliche Schicht unverändert bleibt.

Ist auf diese Weise das negative Bild hervorgerufen, so müssen die empfindlichen Substanzen aus der Kollodiumschicht entfernt werden, weil sonst nach kurzer Zeit unter Einwirkung des Tageslichtes die ganze Kollodiumschicht schwarz werden würde. Es geschieht dies dadurch, daß man die Platte mit einer Lösung von Cyankalium oder unterschwefligsaurem Natrium übergießt und dann mit Wasser abwäscht, wodurch, wie man sagt, das Bild fixiert wird.

Die Herstellung des positiven Bildes beruht auf der Einwirkung des Lichtes auf Chlorsilber. Man legt feines Druckpapier eine Minute lang auf eine Kochsalzlösung, der man, um das Papier zu leimen, Eiweiß zugesetzt hat und läßt es nach dem Trocknen und zwar im Dunklen auf einer Lösung von salpetersaurem Silber schwimmen, wobei sich das Kochsalz mit dem salpetersauren Silber in Chlorsilber und salpetersaures Natrium umsetzt. Nachdem das Papier gleichmäßig mit Chlorsilber durchsetzt ist, wird dasselbe getrocknet und im Dunklen aufbewahrt.

Das negative Glasbild wird nun in einen vorn mit einer Glasplatte versehenen Rahmen (den Kopierrahmen) gebracht und darauf das Chlorsilberpapier und hinter dieses dann ein schwarzes Tuch gelegt. Nachdem alles durch eine von hinten her angepreßte Rückwand gehörig gegen Verschiebung gesichert ist, wird der Kopierrahmen so den Sonnenstrahlen ausgesetzt, daß dieselben durch die hellen Stellen des negativen Bildes hindurch auf das Chlorsilberpapier fallen und hier eine Schwärzung hervorbringen. Ist auf diese Weise das positive Bild auf dem Papiere hergestellt, so muß, um das vollständige Schwarzwerden desselben zu verhindern, das noch unzersetzte Chlorsilber aus dem Papier ausgewaschen werden. Dies geschieht dadurch, daß man es eine Zeit lang in eine Auflösung von unterschwefligsaurem Natrium und dann in reines Wasser legt, wodurch nun auch das positive Bild fixiert ist.

Wenn man das prismatische Farbenspektrum photographiert oder daguerreotypiert, so ergiebt sich, daß nicht alle Strahlen desselben gleich gut wirken; denn die roten, gelben, grünen, ja auch die hellblauen bilden sich wenigstens bei dem gewöhnlichen Verfahren nicht ab. Von dem ganzen Farbenspektrum erscheint im photographischen Bilde nur der Teil, der von den dunkelblauen und violetten Strahlen getroffen worden war. Außerdem geht aber die chemische Wirkung noch weit über die violette Grenze des sichtbaren Spektrums hinaus, indem im photographischen Bilde noch eine Verlängerung des Spektrums in gleicher Weise auftritt, wie wir sie bei der Fluorescenz kennen lernten. Die Strahlen also, welche vorzugsweise geeignet sind, die Erscheinungen der Fluorescenz hervorzubringen, sind auch vorzugsweise die chemisch wirksamen.

Aus der geringen chemischen Wirkung, welche die roten, gelben und grünen Strahlen hervorbringen, erklärt sich auch, daß bei Daguerreotypen sowohl wie bei Photographieen rote, gelbe und grüne Gegenstände unverhältnismäßig dunkel erscheinen, wodurch oft die Haltung solcher Bilder beeinträchtigt wird.

Viertes Buch.

Die elektrischen Erscheinungen.

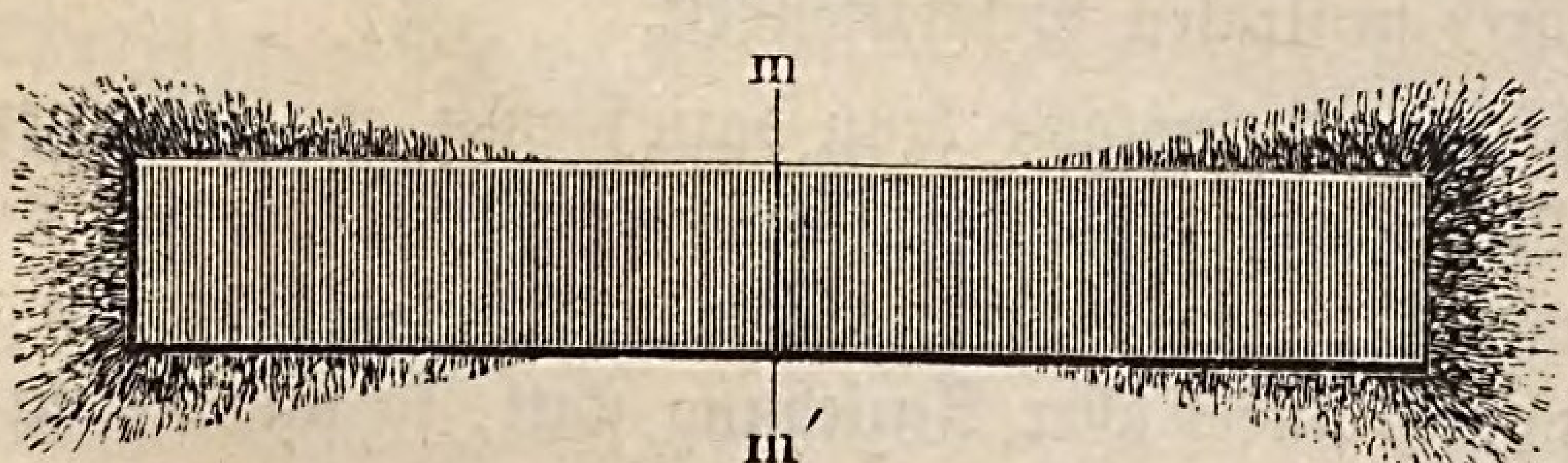
Erstes Kapitel.

Vom Magnetismus.

Anziehung des Eisens durch Magnete. Man findet im Schoße der Erde gewisse Eisenerze, die aus einer Verbindung von Eisenoxydul mit Eisenoxyd (FeO, Fe_2O_3) bestehen und Magnetsteine genannt werden. Diese Erze haben öfters die Eigenschaft, Eisen anzuziehen, und heißen dann natürliche Magnete. Dem Eisen läßt sich dieselbe Eigenschaft vorübergehend, dem gehärteten Stahle läßt sie sich bleibend mitteilen; die aus Stahl verfertigten Magnete heißen künstliche Magnete. Um die Gesetze des Magnetismus zu untersuchen, wendet man am besten künstliche Magnete an, weil man ihnen leicht eine zweckmäßige Form geben kann. Gewöhnlich haben die künstlichen Magnete die Gestalt von Stäben, Nadeln oder von Hufeisen. 179

Taucht man einen Magnetstab in Eisenfeilspäne, so beobachtet man, daß sie sich an denselben anhängen, jedoch nicht überall gleichmäßig hängen bleiben. In der Mitte des Stabes fallen sie gleich ab; hier scheint der Magnetstab gar keine anziehende Wirkung auf die Feilspäne auszuüben; diese neutrale Stelle wird deshalb auch Mittellinie genannt. Von der Mittellinie nach beiden Enden des Magnets hin nimmt die anziehende Kraft zu, indem hier die meisten Feilspäne hängen bleiben, wie dies Fig. 365 andeutet. Die Stellen der größten Anziehung nennt man Pole.

Fig. 365.



Auf den ersten Anblick hin könnte man glauben, daß, wenn man einen Magnet entzwei bricht, jedes einzelne Stück kein vollständiger Magnet mehr wäre, sondern nur noch an

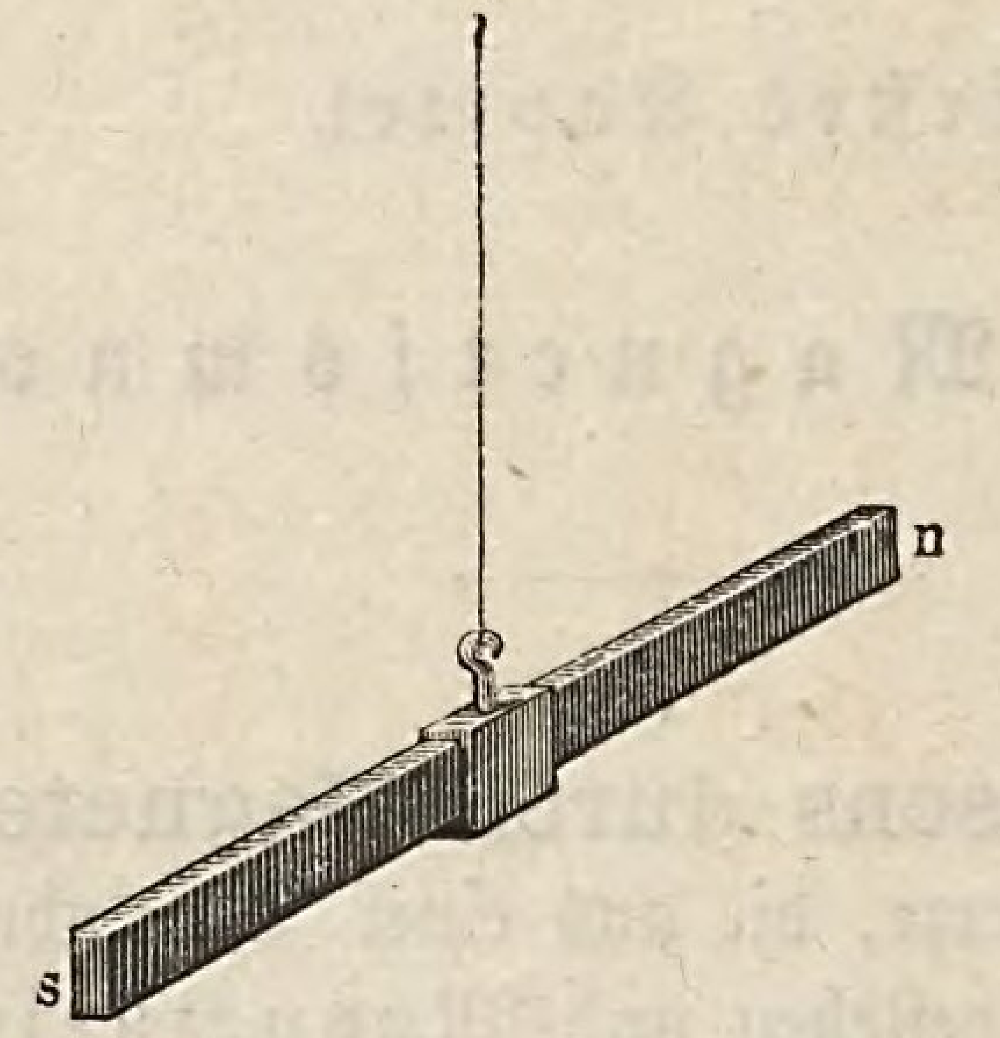
dem einen Ende Eisen anziehen könnte. Der Versuch, der sich mit einem magnetisierten Stahldraht leicht anstellen läßt, zeigt aber das Gegenteil: jedes Stück ist wieder ein vollständiger Magnet, welcher seine Mittellinie und seine Pole hat, und bei abermaligem Zerbrechen abermals einen vollständigen Magnet liefert, wie dies Fig. 366 anschaulich macht.

Fig. 366.



180 **Magnetische Polarität.** Die Fig. 367 stellt einen Magnetstab dar, welcher in einer Hülse von Papier oder Metall liegt und horizontal aufgehängt ist. Erteilt man diesem Magnet eine horizontale Drehung und überläßt ihn hierauf sich selbst, so nimmt er nach einigen Schwingungen stets wieder dieselbe Richtung an und stellt sich ungefähr von Süd nach Nord; dabei zeigt immer derselbe Pol nach Norden und immer der andere Pol nach Süden. Ersteren nennt man deshalb den Nordpol, letzteren den Südpol des Magnets; die Richtung, nach welcher der Nordpol zeigt, wird die Richtung des Magnets genannt.

Fig. 367.



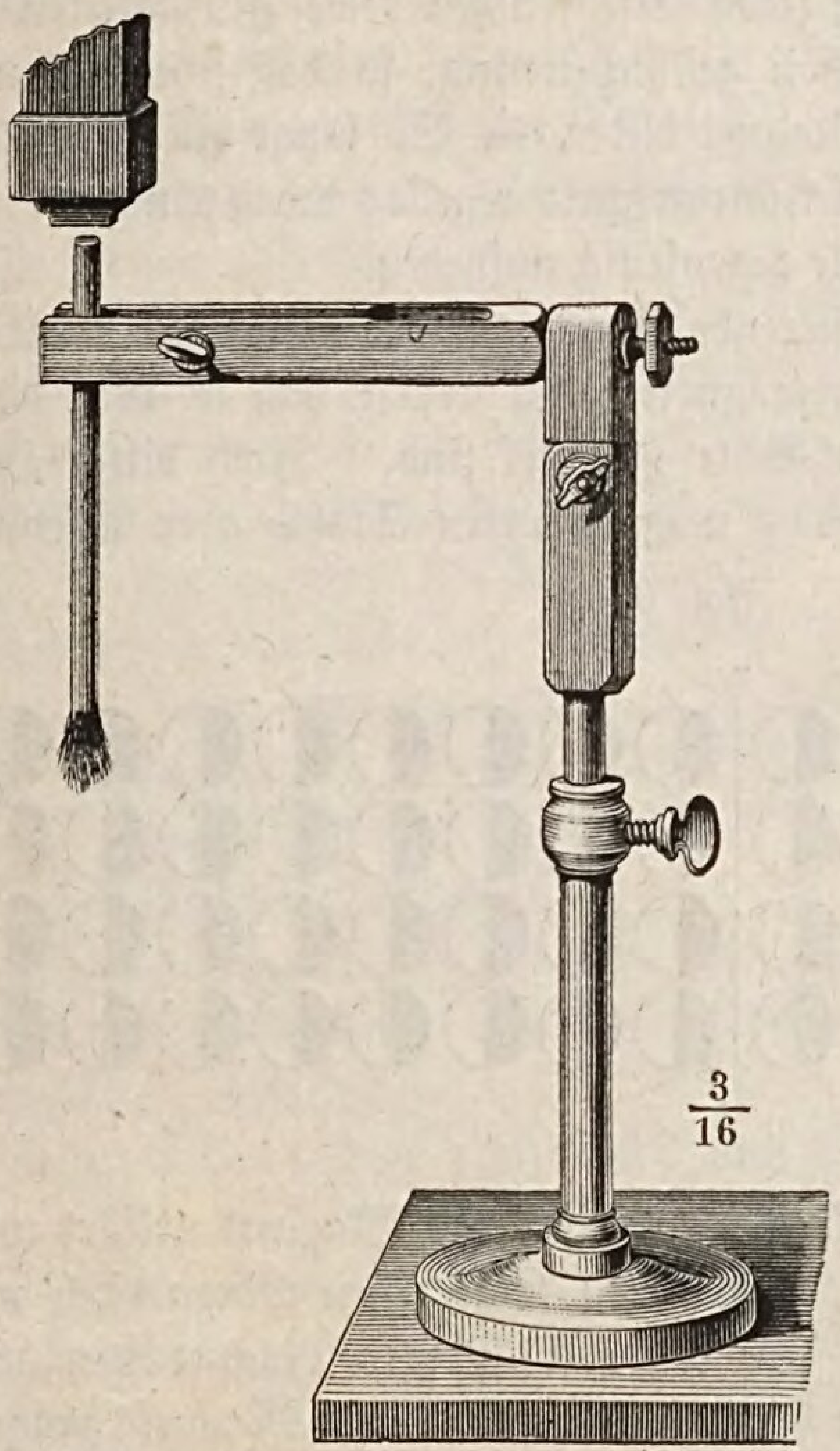
Nähert man dem Nordpole des aufgehängten Magnets den Nordpol eines anderen Magnets, so stoßen sich die beiden Pole ab; ein gleiches Verhalten zeigen auch die Südpole gegen einander. Bringt man aber in die Nähe des Nordpols des aufgehängten Magnets den Südpol des anderen Magnets, oder umgekehrt in die Nähe des Südpols des ersteren den Nordpol des letzteren, so findet Anziehung statt. Man drückt diese Eigenschaft der magnetischen Pole durch den Satz aus: Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

In den beiden Hälften, in welche ein Magnet durch die Mittellinie zerlegt wird, wirken also zwei Kräfte, welche erst ganz gleichartig zu sein schienen, weil sie auf gleiche Weise auf das Eisen wirken, in der That aber zwei ganz entgegengesetzte Kräfte sind. Die Mittellinie ist also die Grenze zweier entgegengesetzter Kräfte, sie bildet den Übergang von der einen zur anderen, und darin liegt auch die Ursache ihrer neutralen Beschaffenheit.

Die gegenseitige Wirkung der Magnetpole kann dazu dienen, mittels einer Magnetnadel die Pole eines Magnetstabes zu unterscheiden. Zu diesem Zwecke nähert man einen Pol der Nadel einem Pole des Stabes; findet Abstoßung statt, so sind die Pole gleichnamig, findet aber Anziehung statt, so sind sie ungleichnamig.

Magnetisierung des Eisens durch Magnete. Wenn ein 5 bis 8 mm dickes Eisenstäbchen durch ein passendes Stativ so in vertikaler Stellung festgehalten wird, wie es Fig. 368 zeigt, und man dem oberen Ende desselben den Pol eines kräftigen Magnets so nahe bringt, daß dieser nur noch durch ein dazwischen gelegtes Papierblatt von dem Stäbchen getrennt ist, so wird letzteres selbst zu einem Magnet. Dies erkennt man daran, daß an seinem unteren Ende Eisenfeilspäne, ja selbst kleine Nägel hängen bleiben. Daß diese Anziehung nicht etwa eine unmittelbare Fernewirkung des darüber gehaltenen Magnets ist, geht daraus hervor, daß die Eisenfeilspäne an dem Stäbchen nicht hängen bleiben, wenn es nicht von Eisen, sondern von einem anderen Stoffe, etwa von Messing oder von Holz ist. 181

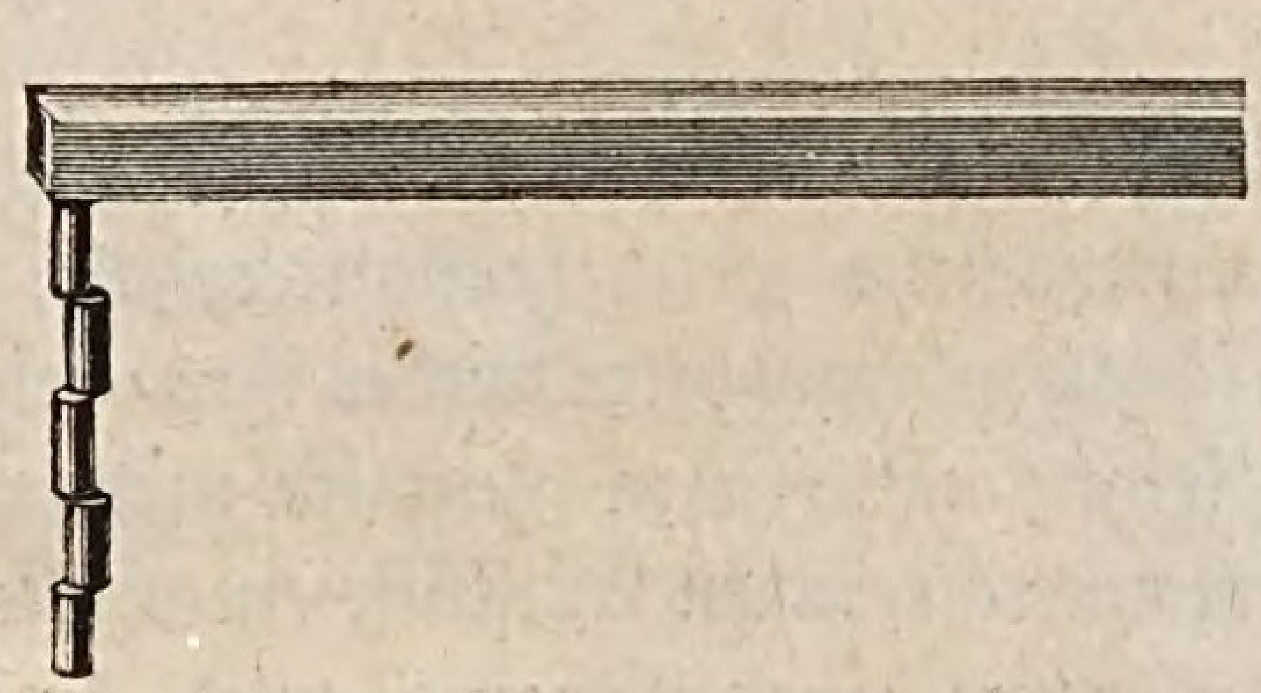
Fig. 368.



$\frac{3}{16}$

Sobald man den magnetisierenden Pol langsam entfernt, verliert sich auch der Magnetismus des Eisenstäbchens wieder, und die bis dahin getragenen Feilspäne fallen herab.

Fig. 369.



Da also jedes an einem Magnetpol angehängte Eisenstäbchen selbst zu einem Magnet wird, so ist ein solches im Stande, ein zweites zu tragen, an das zweite kann man ein drittes und so fort eine kleinere oder größere Kette anhängen, wie Fig. 369 erläutert. Die Magnetisierung des Eisens durch benachbarte Magnete wird *magnetische Verteilung* genannt.

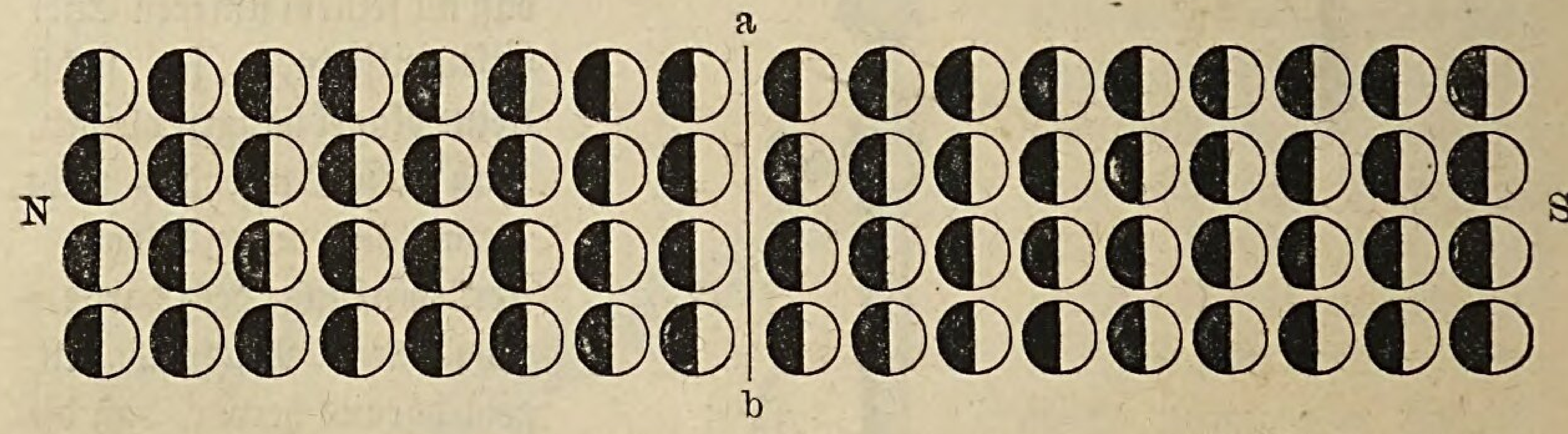
Magnetische Fluida. Um die verschiedenen Erscheinungen des Magnetismus zu erklären, nimmt man an, daß es zwei verschiedene *unwägbare (imponderable)* magnetische Flüssigkeiten giebt, welche in einer sogleich 182

näher zu betrachtenden Weise in einem Magnete verteilt sind; die Teilchen ein und derselben Flüssigkeit stoßen einander ab, dagegen ziehen sie die Teilchen der entgegengesetzten Flüssigkeit an.

Man denkt sich ferner, daß jedes Eisenteilchen beide Flüssigkeiten in gleicher Menge enthält, die aber schon geschieden sind, so daß jedes Eisenmolekül ein- für allemal einen kleinen Magnet bildet. — So lange ein Eisenstab nicht magnetisch ist, liegen diese Molekularmagnete regellos durch einander, so daß ihre Wirkungen in die Ferne sich gegenseitig aufheben.

Sobald aber eine magnetisierende Kraft auf den Eisenstab wirkt, so hat diese ein Bestreben, die Molekularmagnete so zu stellen, daß in allen die gleichnamigen Pole nach der gleichen Seite gerichtet sind. Nach dieser Hypothese stellt Fig. 370 einen vollständig magnetisierten Stahl- oder Eisenstab dar.

Fig. 370.



Durch diese Vorstellungsweise ist die Polarität des Magnets erklärt und man begreift zugleich, wie es kommt, daß, wenn man einen Magnetstab zerbricht, alsdann jedes Stück wieder für sich ein vollständiger Magnet sein muß.

Wenn also ein Stück Eisen durch den Einfluß eines Magnets magnetisiert wird, so geht kein magnetisches Fluidum vom Magnet auf das Eisen über, sondern die Nähe des Magnets veranlaßt bloß, daß alle Molekularmagnete gleichgerichtet werden.

Das Eisen behält nur so lange seine magnetischen Eigenschaften, als die Nähe eines Magnets die Molekularmagnete gleich gerichtet erhält; sobald der Magnet entfernt wird, nehmen die Molekularmagnete wieder ihre vorige regellose Lage an, d. h. das Eisen kehrt in seinen natürlichen Zustand zurück.

Der Stahl widersteht dem magnetisierenden Einflusse eines Magnets weit stärker als Eisen, d. h. durch Annäherung eines Magnets wird ein Stahlstück, namentlich wenn es etwas groß ist, nicht gleich so stark magnetisch wie ein Eisenstück. Wiederholt man den durch Fig. 368 dargestellten Versuch, nachdem man das Eisenstäbchen durch ein gehärtetes Stahlstäbchen von gleicher Größe ersetzt hat, so werden kaum einige Feilspänchen an dem unteren Ende des Stahlstäbchens hängen bleiben, während sich unter gleichen Umständen an das Eisenstäbchen ein ganzes Bündel Späne anhing. Um einen Stahlstab einigermaßen stark zu magnetisieren, muß man ihn längere Zeit mit dem Magnet in Berührung lassen, oder er muß mit demselben mehrmals in geeigneter Weise gestrichen werden; wenn aber der Stahl einmal magnetisch ist, so verliert er

diese Eigenschaft auch so leicht nicht wieder; man kann also aus Stahl bleibende oder permanente Magnete herstellen, aber nicht aus Eisen.

Wenn man von der obigen Theorie des Magnetismus ausgeht, muß man also annehmen, daß die Molekularmagnete des weichen Eisens durch eine von außen her wirkende, magnetisierende Kraft leicht gedreht werden können, jedoch infolge ihrer gegenseitigen Einwirkung auf einander auch wieder leicht in ihre ursprüngliche regellose Lage zurückkehren, wenn die äußere magnetisierende Kraft zu wirken aufhört.

Anders ist es beim gehärteten Stahl: hier macht sich ein Widerstand, die sogenannte Koercitivkraft, gegen jede Drehung der Molekularmagnete geltend, welche einerseits der Magnetisierung durch äußere Kräfte entgegenwirkt, anderseits aber auch nach erfolgter Magnetisierung die Rückkehr der Molekularmagnete in ihre neutrale Stellung hindert.

Am schwersten läßt sich vollkommen gehärteter Stahl magnetisieren; er verliert aber auch, wenn er einmal magnetisch ist, diese Eigenschaft nicht leicht wieder. Wenn man dem gehärteten Stahle durch Anlassen seine Härte mehr und mehr nimmt, so nähert er sich in seinem Verhalten gegen den Magnetismus mehr und mehr dem weichen Eisen.

Weißglühendes Eisen wird von einem Magnet nicht mehr angezogen, wohl aber rotglühendes. Ein Stahlmagnet verliert durch Glühen seinen Magnetismus vollständig.

Außer Eisen können auch Nickel und Kobalt magnetisch werden.

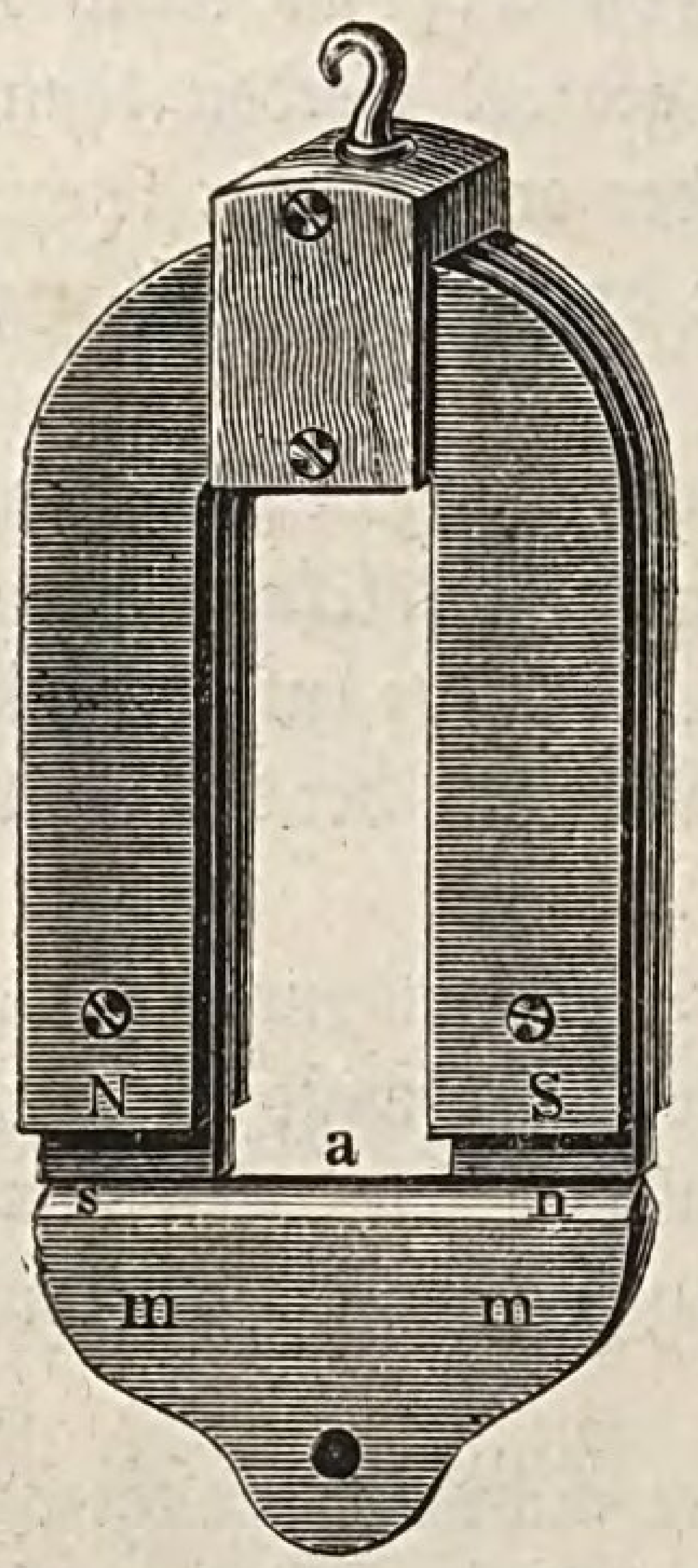
Verschiedene Formen künstlicher Magnete. Je nach den verschiedenen Zwecken giebt man den Stahlmagneten verschiedene Formen, 183
nämlich die von Magnetnadeln, welche in §. 185 näher besprochen werden, von Stäben oder endlich, wenn es sich um große Tragkraft handelt, von Hufeisen.

Fig. 371 (a. f. S.) stellt einen zusammengesetzten Hufeisenmagnet dar. Er besteht aus mehreren einfachen, hufeisenförmig gebogenen magnetisierten Stahlplatten, welche mit ihren gleichnamigen Polen auf einander gelegt sind und durch Schrauben zusammengehalten werden. Eine an beide Pole angelegte Platte *mm* von weichem Eisen bildet den Anker, an welchen man mittelst einer Wagschale weitere Gewichte anhängen kann.

Die Tragkraft eines zusammengesetzten Magnets ist keineswegs der Summe der Tragkräfte der Einzelmagnete gleich, aus denen er zusammengesetzt ist, sondern sie ist weit geringer. Der Grund davon ist leicht einzusehen. Legt man zwei gleich geformte Stahlmagnete mit ihren gleichnamigen Polen auf einander, so strebt jeder, die Polarität des anderen umzukehren, was notwendig eine gegenseitige Schwächung der magnetischen Kraft zur Folge hat. So kommt es denn auch, daß die Tragkraft der Hufeisenmagnete in weit geringerem Verhältnisse wächst als ihre Masse. Ein guter 4lötiger Hufeisenmagnet kann das 25fache, ein 100pfündiger kann nicht einmal das 3fache seines eigenen Gewichtes tragen.

Dagegen ist die Gesamttragkraft eines Hufeisenmagnets weit größer als die Summe der Tragkräfte seiner beiden Pole. Während z. B. ein Hufeisenmagnet 12 Pfund trug, wenn der Anker mit beiden Polen in Berührung war, wie in Fig. 371, konnte jeder einzelne Pol nur zwei Pfund tragen.

Fig. 371.



Es läßt sich dies leicht erklären. Wenn der Anker wie in Fig. 371, mit beiden Polen des Hufeisenmagnets in Berührung ist, so wird er natürlich weit kräftiger magnetisiert, als wenn er nur mit dem einen Pol in Berührung steht; denn der in *n* durch den Magnetpol *S* erzeugte Nordpol wird durch den magnetisierenden Einfluß verstärkt, welchen der Pol *N* auf den Anker ausübt. Ebenso wird in *s* ein Südpol erzeugt, nicht allein durch den Einfluß des Poles *N*, sondern auch durch den von *S*.

Durch die Vermittelung des Ankers wirkt also der Pol *N* auch verstärkend auf *S* und umgekehrt *S* auf *N*. Dadurch erklärt es sich auch, daß die Tragkraft von Hufeisenmagneten, welche durch einen Anker längere Zeit geschlossen bleiben, oft noch zunimmt, während umgekehrt ein Abreißen des Ankers meist eine Schwächung der magnetischen Kraft zur Folge hat.

Legt man an die beiden Polflächen eines natürlichen Magnets die Eisenplatten *l* und *l'* (die Flügel), Fig. 372 und 373, welche in den Füßen

Fig. 372.

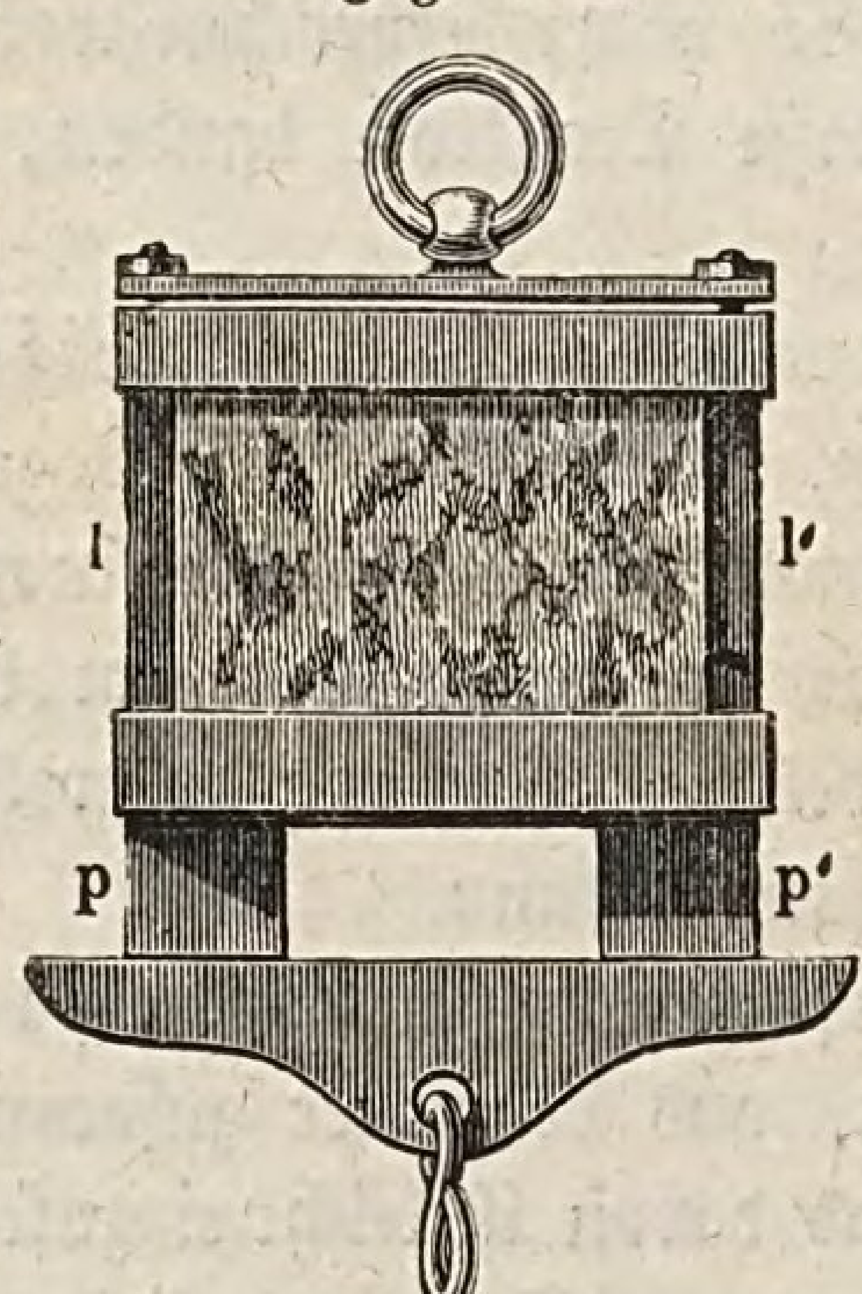


Fig. 373.

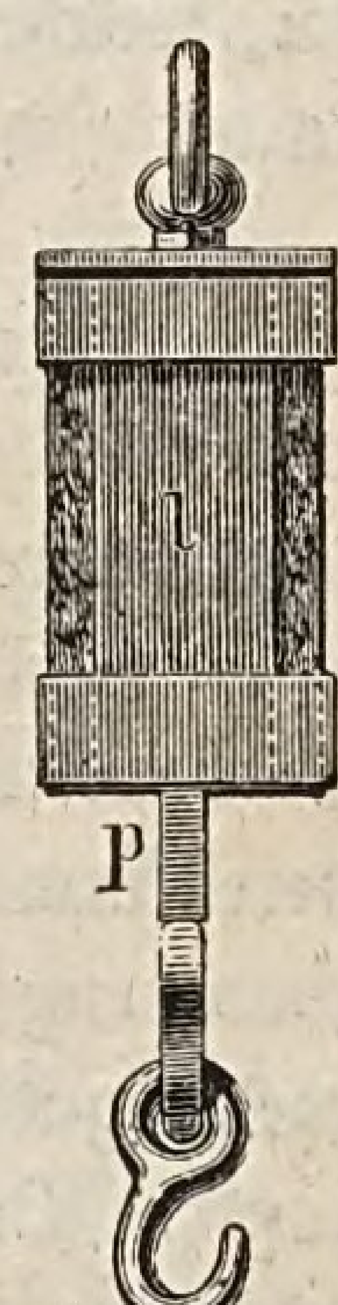
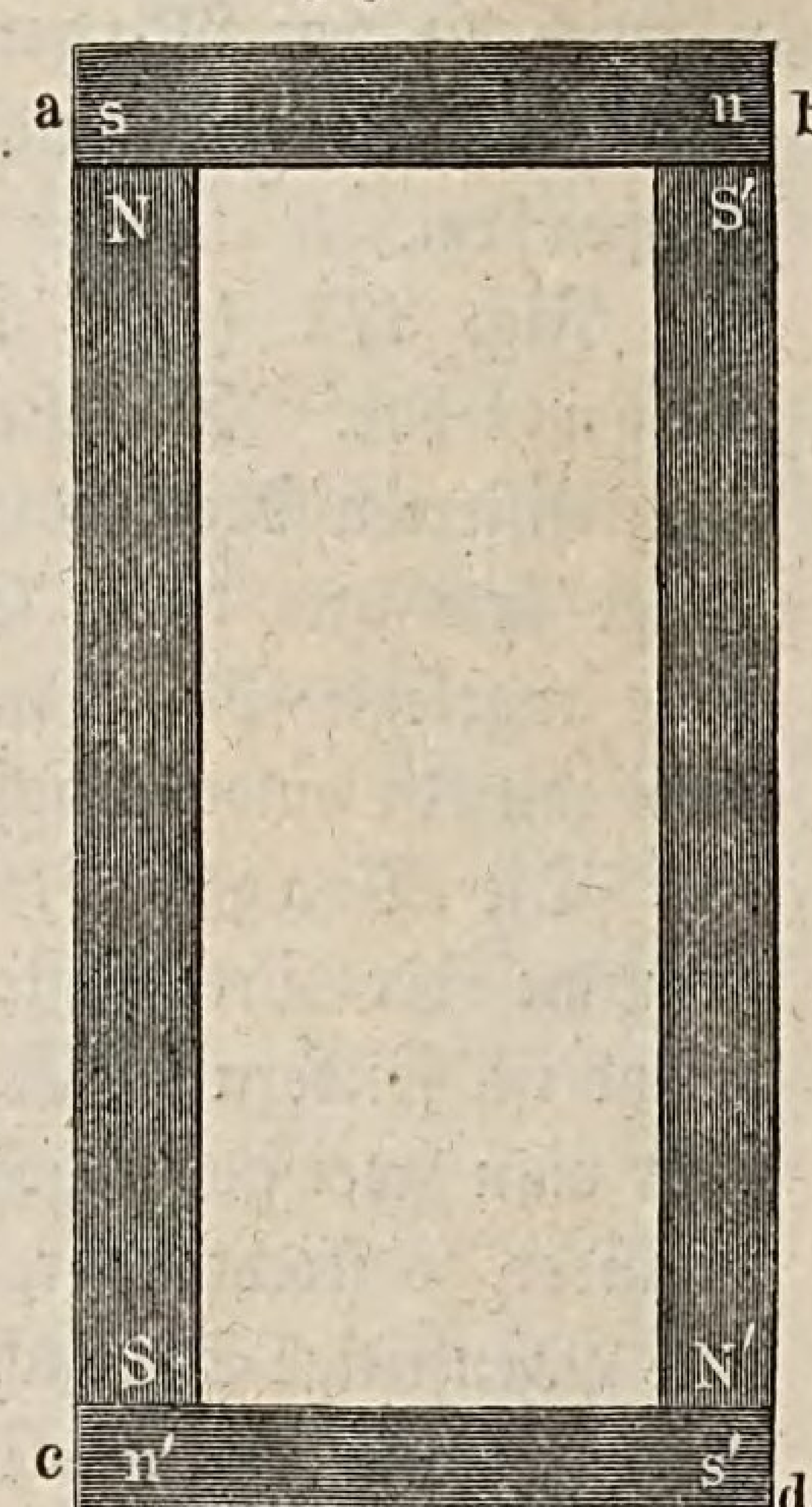


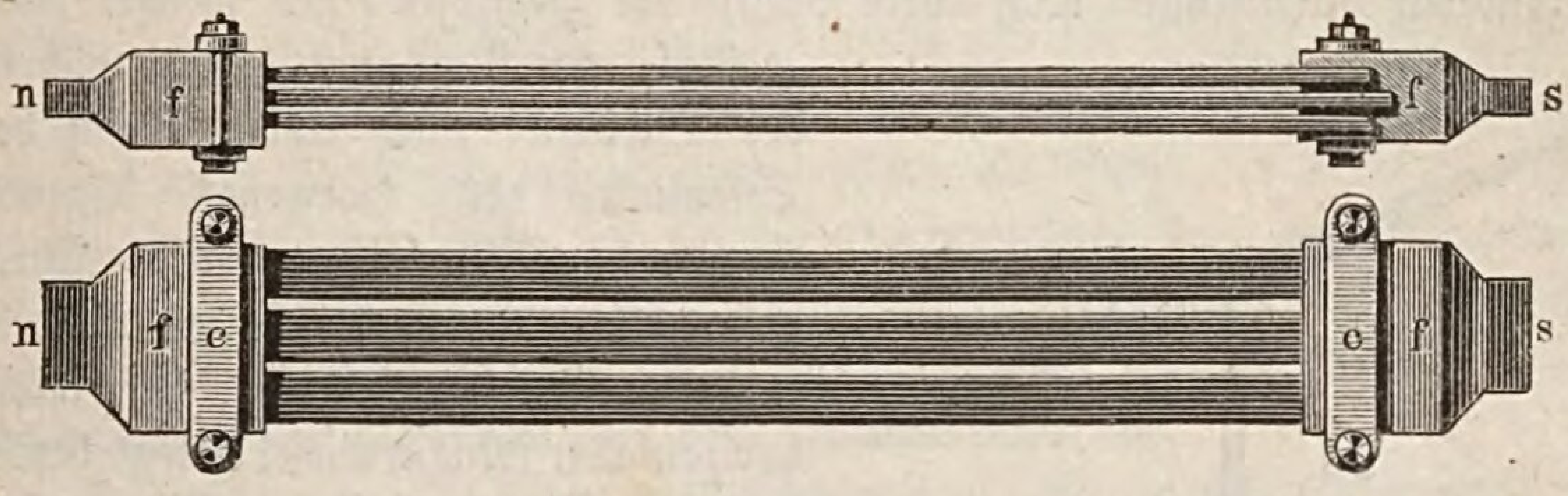
Fig. 374.



p und *p'* endigen, so werden in *p* und *p'* ungleichnamige magnetische Pole erzeugt, an welche man einen Anker anlegen kann, wie an die Pole eines Hufeisenmagnets. Eine solche an einem natürlichen oder auch an einem künstlichen Magnet angebrachte Eisenfassung wird als **Armatur des Magnets** bezeichnet.

Um den Magnetismus in Magnetstäben ungeschwächt zu erhalten, legt man sie in der Weise parallel neben einander (Fig. 374), daß der Nordpol

Fig. 375.



des einen und der Südpol des anderen nach derselben Seite gerichtet sind, und fügt alsdann die Eisenstücke *ab* und *cd* so an, daß dadurch ein geschlossenes Rechteck gebildet wird. Die Wirkung der Eisenplatten *ab* und *cd* ist hier ganz dieselbe wie die des Ankers beim Hufeisenmagnet.

Um mehrere einfache Magnetstäbe zu einem magnetischen Magazin zu verbinden, werden einerseits alle Nordpole, andererseits alle Südpole in einem eisernen Schuh befestigt, wie Fig. 375 zeigt.

Magnetisierung von Stahlnadeln und Stahlstäben. Um einen Stahlstab zu magnetisieren, muß man ihn wiederholt an den Polen eines kräftigen Magnets streichen, und zwar ist es am zweckmäßigsten, die eine Hälfte des Stabes (oder den einen Schenkel der hufeisenförmigen Lamelle), deren Ende ein Nordpol werden soll, an dem Südpol, die andere Hälfte des Stabes aber (oder den anderen Schenkel der hufeisenförmigen Lamelle) am Nordpol des magnetisierenden Magnets zu streichen. Man verfährt dabei in der Weise, daß man den zu magnetisierenden Stab immer mit seiner Mitte auf den Magnetpol aufsetzt und die entsprechende Hälfte des Stabes über den Pol wegzieht. 184

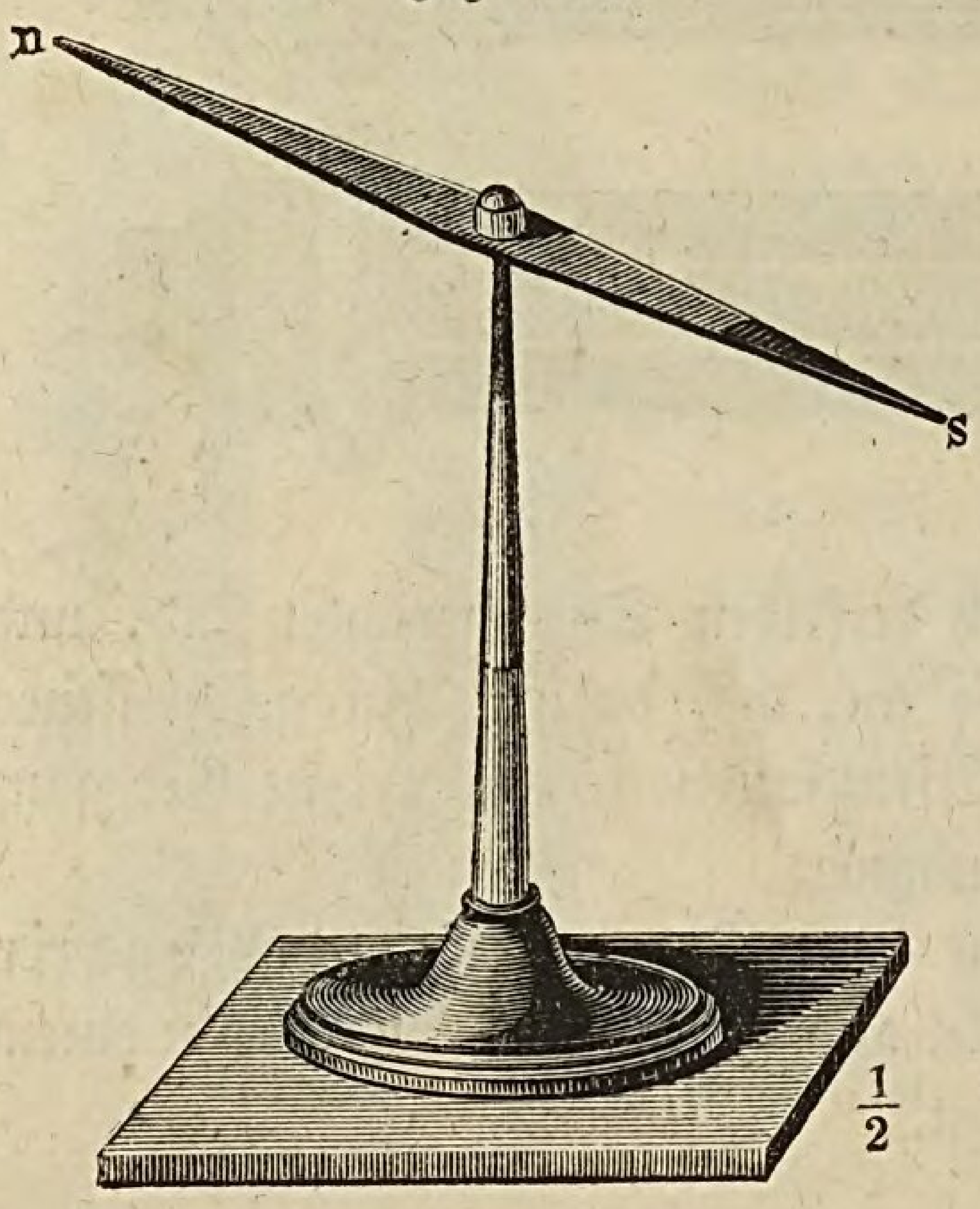
Die magnetisierende Kraft des stärksten Stahlmagnets ist aber zu gering, um auf diese Weise etwas größere und gut gehärtete Stahlstäbe einigermaßen stark zu magnetisieren. Man hat deshalb verschiedene kompliziertere Streichmethoden in Anwendung gebracht, welche jedoch durch die Erfindung der Elektromagnete entbehrlich wurden, da die Pole derselben eine hinlängliche magnetisierende Kraft besitzen, um nach dem eben angegebenen Verfahren auch große und wohlgehärtete Stahlstäbe kräftig magnetisch zu machen.

Die magnetische Deklination. Ein Magnetstab, welcher aufgehängt ist, wie Fig. 367, S. 352 zeigt, oder eine Magnetnadel, wie sie Fig. 376 (a. f. S.) darstellt, in deren Mitte ein Hütchen von Achat oder Stahl angebracht ist, welches auf einer Stahlspitze spielt, kann sich in horizontaler Ebene frei, d. h. unabhängig von der Schwere, drehen, weil der Schwerpunkt der Vorrichtung unter dem Aufhängepunkte liegt. — Eine solche Nadel oder ein solcher Stab zeigt nun, wie früher schon bemerkt wurde, stets ein Bestreben, 185

eine bestimmte Lage anzunehmen, d. h. immer nach einem bestimmten Punkte des Horizonts hinzuzeigen.

In Deutschland und den benachbarten Ländern zeigt der **Nordpol** der horizontalen Magnetnadel nach einem Punkte des Horizontes hin, welcher etwas westlich vom Nordpunkte liegt, während der **Südpol** nach einem östlich vom Südpunkte des Horizonts liegenden Punkte hinweist. Eine vertikale Ebene, die wir uns durch die beiden Pole der in ihrer Gleichgewichtslage befindlichen horizontalen Magnetnadel gelegt denken, heißt der **magnetische Meridian**, während eine vertikale Ebene, die man sich durch den Nord- und durch den Südpunkt des Horizonts gelegt denkt, **astronomischer Meridian** genannt wird. In Fig. 377 stellt *ab* die Horizontalprojektion des magnetischen, *ns* die des astronomischen Meridians dar. Der Winkel, welchen diese beiden Projektionen mit einander bilden, wird die **magnetische Abweichung** oder **Deklination** genannt; man bezeichnet sie als **westliche** oder **östliche**, je nachdem das Nord-Ende der Magnetnadel westlich oder östlich vom astronomischen Meridian liegt.

Fig. 376.



Jeder Apparat, welcher dazu dient, die Deklination zu messen, heißt eine **Deklinationsbussole**. Fig. 378 stellt eine solche Bussole ziemlich einfacher Art vor. Die Spitze, auf welche die Nadel aufgesetzt ist, bildet den

Fig. 377.

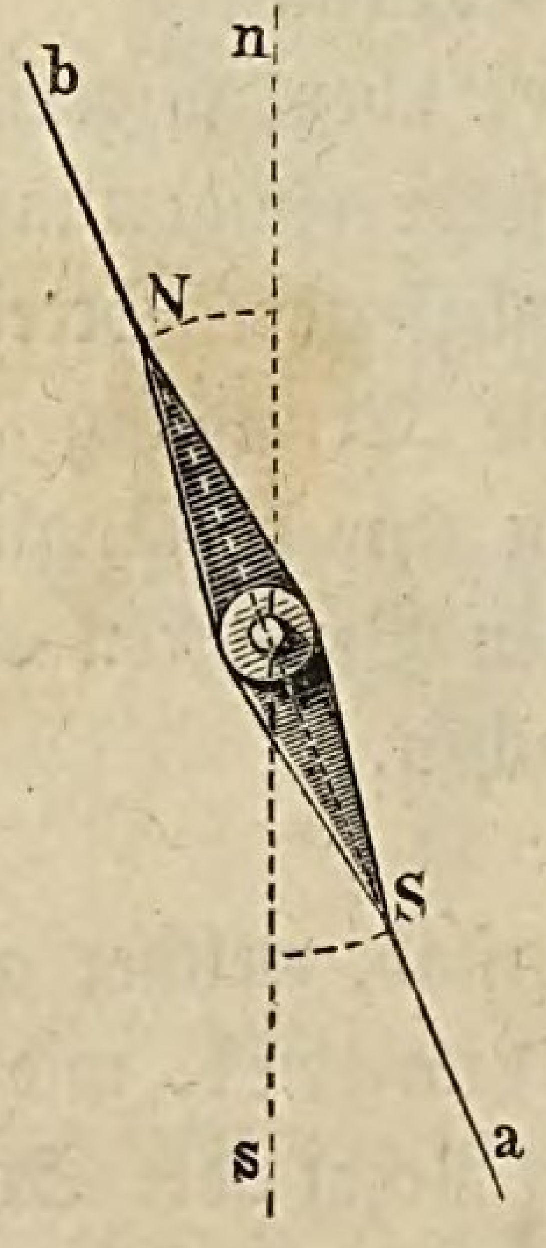
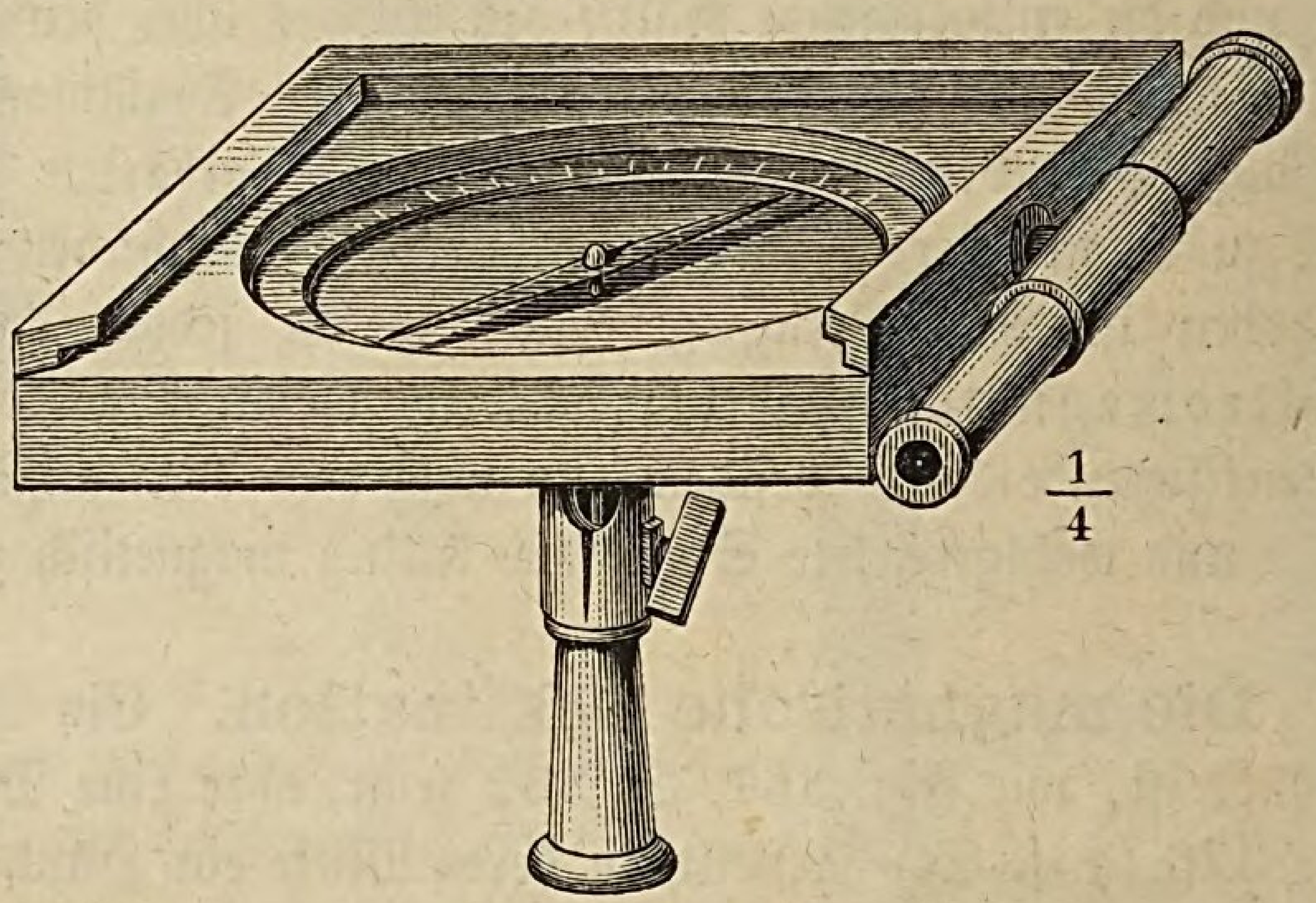


Fig. 378.



Mittelpunkt eines geteilten Horizontalkreises, der um eine vertikale Achse umgedreht werden kann. An der Seite des Gehäuses ist ein Fernrohr angebracht, dessen Achse mit derjenigen Linie parallel läuft, welche man sich vom Nullpunkte

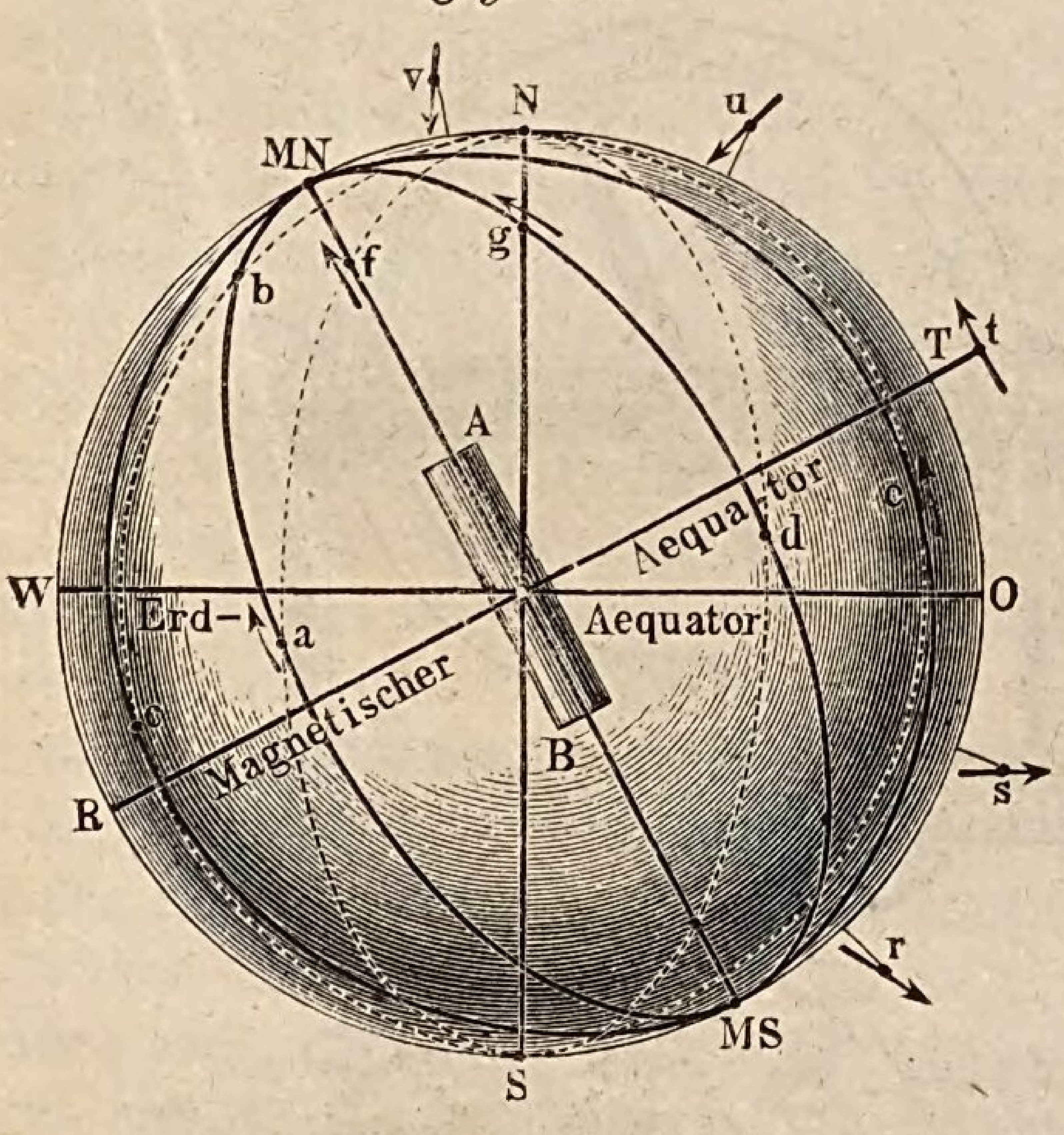
des geteilten Kreises über seinen Mittelpunkt zum Teilstriche 180° gezogen denken kann. Je nachdem man den Horizontalkreis in seiner Ebene umdreht, wird die Spitze der Magnetnadel an andere Teilstriche zu stehen kommen. Stellt man den Apparat so, daß die Nadel gerade auf den Nullpunkt der Teilung zeigt, so ist die Achse des Fernrohres mit der Nadel parallel und fällt in den magnetischen Meridian; bei jeder anderen Stellung aber zeigt die Nadel auf denjenigen Teilstrich des Kreises, welcher die Größe des Winkels angiebt, den die Richtung der Nadel mit der der Horizontalprojektion der Fernrohrachse bildet. Wenn man also das Fernrohr genau in den astronomischen Meridian bringt, so kann man auf dem Teilkreise ablesen, wie groß der Winkel zwischen dem magnetischen Meridian und dem astronomischen ist.

Dieses Instrument kann nun überhaupt als Winkelmeßinstrument dienen, weil man mit Hülfe desselben jederzeit den Winkel bestimmen kann, welchen die Horizontalprojektion der Visierlinie des Fernrohres mit dem magnetischen Meridiane macht.

Die Deklinationsbussole, deren sich die Seefahrer bedienen, ist unter dem Namen **Kompaß** bekannt.

Was nun die Größe der magnetischen Deklination betrifft, so ändert sich dieselbe von einem Orte der Erdoberfläche zum anderen. So beträgt z. B. gegenwärtig die **westliche Deklination** für München, wo v. **Lamont** (1805 bis 1879) die genauesten Messungen ausführte, 12° 23'; **westlich** von München nimmt sie zu, östlich von München nimmt sie ab; sie wird Null im **Uralgebirge** und geht in **Sibirien** in eine **östliche** Deklination über.

Fig. 379.



Auf den Lauf der **Linien gleicher Deklination** werden wir im sechsten Buche zurückkommen.

Die Erscheinungen der magnetischen Deklination beweisen, daß der ganze Erdkörper sich wie ein großer Magnet verhält, und zwar lassen sie sich der Art nach aus der Vorstellung ableiten, daß im Innern der Erde ein mächtiger Magnetstab AB, Fig. 379, enthalten sei, dessen Achse nicht mit der Umdrehungsachse NS der Erde zusammenfällt. Denken wir uns die Achse des hypothetischen Erdmagnets verlängert, so trifft sie die Erdoberfläche in den beiden Punkten MN und MS, welche die **magnetischen Pole** der Erde sind.

Der Magnetismus des Pols A ist gleichnamig mit dem des Südpols, der Magnetismus von B ist gleichnamig mit dem des Nordpols unserer Magnetnadeln.

Denken wir uns nun in irgend einem Punkte der Erdoberfläche, etwa in *a* (oder in *b, c, d, . . . g*), eine Deklinationsnadel aufgestellt, so muß sie sich notwendig in die durch *a* (oder *b, c, d . . . g*) und die Achse des Erdmagnets gelegte Ebene einstellen; der durch *a* (oder *b, c, d . . . g*) und die magnetischen Erdpole *MN* und *MS* gelegte größte Kreis ist also der magnetische Meridian des Punktes *a* (oder *b, c, d . . . g*) und dieser macht einen Winkel mit dem durch eine punktierte Linie angedeuteten astronomischen Meridian *NaS* (oder *NbS . . . NgS*).

Auf der ganzen vorderen Hälfte der in Fig. 379 dargestellten Erdkugel ist die Deklination eine westliche. Auf dem größten Kreise *NOSW*, welcher durch die Umdrehungsachse *NS* der Erde und ihre magnetische Achse gelegt ist, fällt der magnetische Meridian mit dem astronomischen zusammen; hier ist also die Deklination gleich Null, während sie auf der hinteren, dem Beschauer der Fig. 379 abgewendeten Hälfte der Erdkugel eine östliche sein muß.

So giebt uns also die durch Fig. 379 veranschaulichte Hypothese wenigstens ein ungefähres Bild der Wirkungen des Erdmagnetismus auf die horizontale Magnetnadel.

186 **Magnetische Inklination.** Die Magnetnadeln, welche wir bisher betrachtet haben, sind in einer Weise aufgehängt, daß sie sich nur in einer horizontalen Ebene, also um eine vertikale Achse drehen können. Sowohl bei der in Fig. 367 als auch bei der in Fig. 376 dargestellten Aufhängung ist die

Fig. 380.

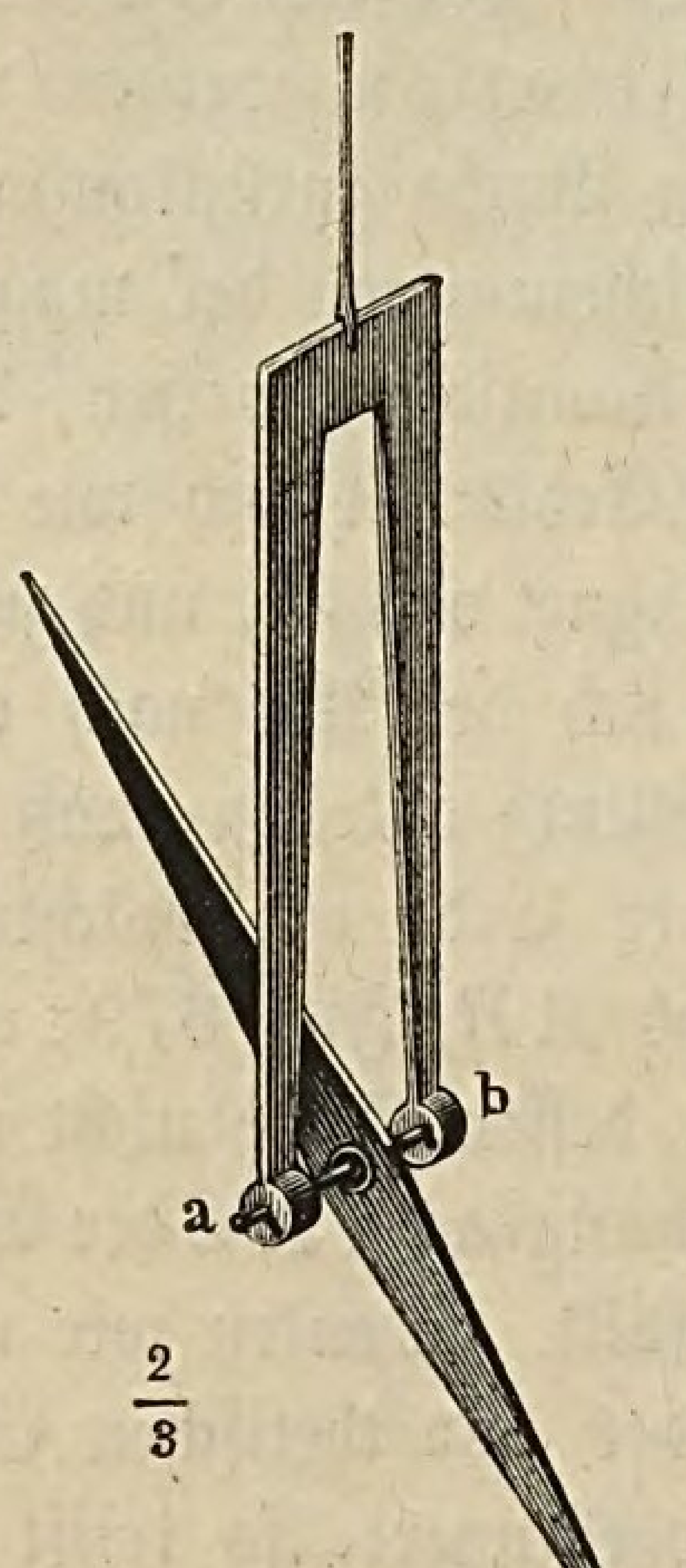
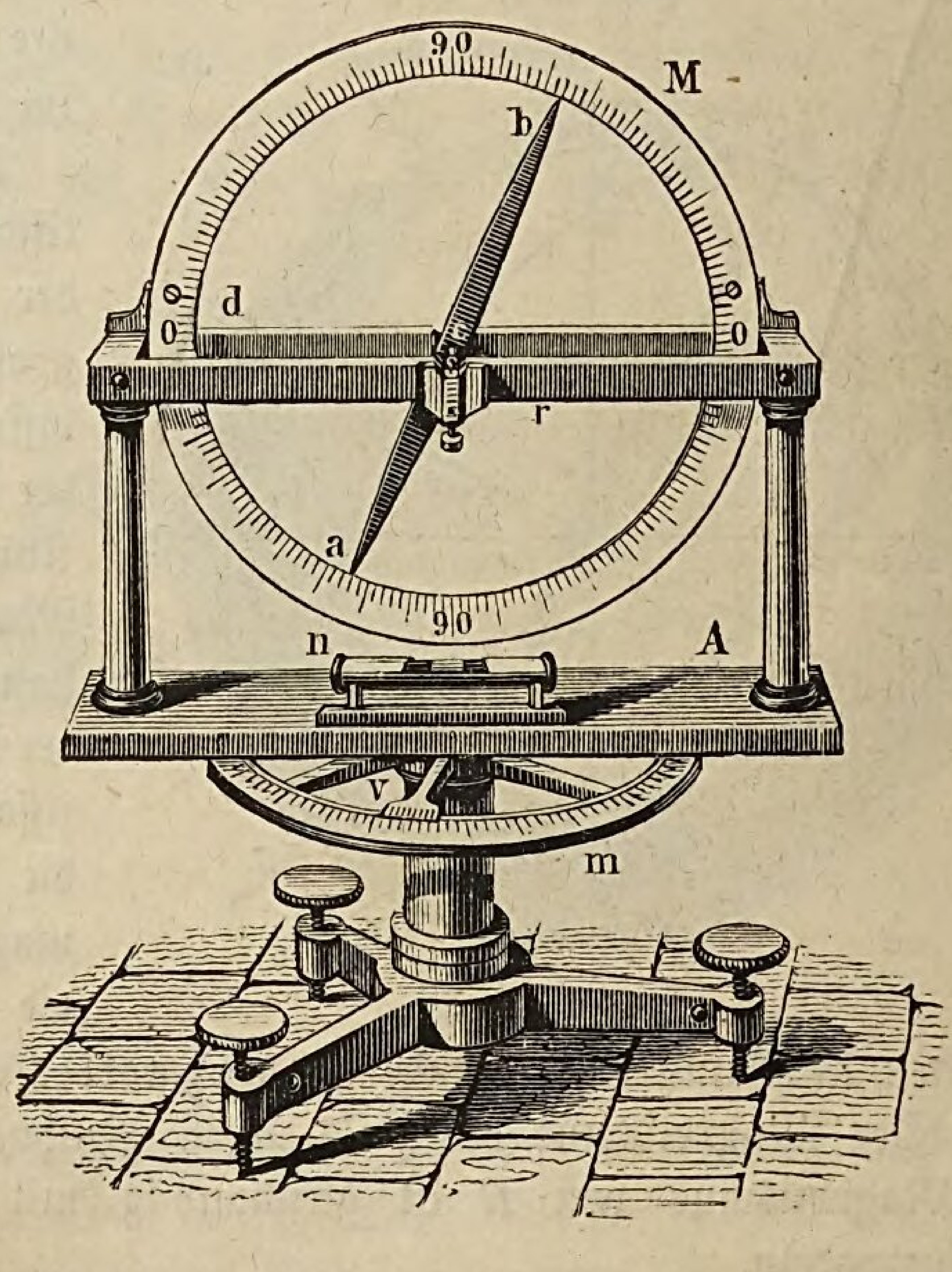


Fig. 381.



horizontale Stellung dadurch gesichert, daß der Schwerpunkt der Nadel vertikal unter dem Aufhängepunkt liegt. Sobald man aber eine Magnetnadel in ihrem Schwerpunkte selbst aufhängt, so bleibt sie nicht wagerecht stehen, sondern sie macht mit der Horizontalen einen Winkel, welcher den Namen der Inklination führt.

Der Fig. 380 abgebildete Apparat ist sehr geeignet, die Inklination der Magnetnadel zu zeigen. In einem Rahmen von Messing, welcher an einem Faden aufgehängt ist, befindet sich eine sehr leicht bewegliche horizontale Achse *ab*, welche durch den Schwerpunkt einer Magnetnadel geht. Man sieht, daß eine so aufgehängte Magnetnadel sich um eine vertikale und um eine horizontale Achse drehen und also dem richtenden Einflusse der Erde ganz frei folgen kann. Die Nadel stellt sich nun so, daß ihre Längenachse in den magnetischen Meridian fällt: bei uns, wie in ganz Europa senkt sich aber das Nord-Ende der Inklinationsnadel.

Ist die Inklinationsnadel in einem geteilten Vertikalkreise angebracht, dessen Ebene mit der Umdrehungsebene der Nadel zusammenfällt, wie in Fig. 381, so kann man auf diesem Kreise die Größe der Inklination ablesen, wenn man dafür sorgt, daß die Ebene des Vertikalkreises genau in den magnetischen Meridian fällt.

Solche Apparate, welche dazu dienen, die Inklination zu messen, heißen Inklinatorien oder Inklinationsbussolen.

Für München beträgt gegenwärtig die magnetische Inklination ungefähr 63° 30′. Von hier aus nimmt die Inklination nach Norden hin zu und auf dem magnetischen Nordpol der Erde muß sich die Inklinationsnadel ganz senkrecht stellen, die Inklination muß 90° werden. Kapitän Roß hat den magnetischen Nordpol der Erde selbst erreicht; er fand ihn unter 75° 5′ nördlicher Breite (also fast 20° vom Nordpol der Erde entfernt) und 263° 14′ östlich von Greenwich, auf der Insel Melville im Norden von Amerika.

In höheren Breiten wird die Inklination so bedeutend und infolge dessen der horizontale Teil des Erdmagnetismus so gering, daß der Kompaß für die Seefahrer seine Brauchbarkeit verliert.

Geht man von Deutschland aus nach Süden, so nimmt die Inklination mehr und mehr ab, und in der Äquatorialzone kommt man zu einem Punkte, wo die Inklination Null ist, wo also die Inklinationsnadel vollkommen wagerecht steht. Geht man noch weiter nach Süden, so beobachtet man abermals eine Inklination, aber eine entgegengesetzte; es ist nun das nach Süden gekehrte Ende, welches sich tiefer stellt. Diese Inklination nimmt nun ebenfalls mit der südlichen Breite zu. In der Nähe des Südpols der Erde giebt es demnach einen zweiten Punkt, an welchem sich die Inklinationsnadel völlig vertikal stellt, und dies ist der magnetische Südpol der Erde.

In welcher geographischen Länge man auch die Äquatorialzone passieren mag, so wird man doch immer einen Punkt finden, wo die Inklinationsnadel wagerecht steht. Sämtliche Orte ohne Inklination bilden eine um die ganze Erde laufende Kurve, welche man den magnetischen Äquator nennt.

Die durch Fig. 379, S. 359 erläuterte Hypothese eines Erdmagnets erklärt auch wenigstens der Art nach die Erscheinungen der magnetischen Inklination. An einem Orte T der Erdoberfläche, welcher gleich weit von A und B entfernt ist, muß sich die Inklinationsnadel horizontal stellen, weil beide Pole des Erdmagnets gleich stark auf sie wirken; T ist also ein Punkt des magnetischen Äquators. Je mehr man sich von T aus dem magnetischen Erdpol MN nähert, desto mehr überwiegt die Wirkung des Poles A auf die Nadel, desto mehr wird sich also ihr Nord-Ende senken müssen, wie dies bei u und v angedeutet ist, während sich südlich vom magnetischen Äquator, etwa in s und r, das Süd-Ende der Nadel senken muß, weil hier die Wirkung des Poles B überwiegt.

187 **Variationen der Deklination und Inklination.** Die Deklination und die Inklination ändern sich nicht nur mit dem Orte, sondern auch mit der Zeit. So war im Jahre 1580 die Deklination zu Paris 11° 30′ östlich; sie nahm dann ab und war im Jahre 1663 gleich Null; von dieser Zeit an wurde die Deklination westlich und wuchs beständig bis zum Jahre 1814, wo sie ihr westliches Maximum von 22° 34′ erreichte, um alsdann wieder kleiner zu werden.

Die Inklination der Magnetnadel hat zu Paris vom Jahre 1671, wo sie ungefähr 75° betrug, fortwährend abgenommen, so daß sie gegenwärtig daselbst ungefähr 66° 38′ beträgt.

Diese ganz allmähligen Veränderungen der Deklination und Inklination, welche die Folge einer langsamen Ortsveränderung der magnetischen Pole der Erde sind, nennt man sekuläre Variationen; es sind dies jedoch nicht die einzigen Veränderungen, welchen die Richtung der Magnetnadel unterworfen ist.

Wenn man eine sehr empfindliche Deklinationsnadel des Tages mehrere Male beobachtet, so findet man, daß sie ihre Richtung fortwährend aber nur wenig ändert, indem sie sich bald östlich, bald westlich von ihrer mittleren Lage entfernt; diese Schwankungen sind bald mehr regelmäßig und periodisch, bald mehr zufällig und plötzlich. Erstere sind die täglichen Variationen, letztere nennt man Störungen.

Im allgemeinen bewegt sich das Nordende der Nadel vom Sonnenaufgange an nach Westen und beginnt dann von 5 Uhr Abends an seinen Rückweg.

Die Amplitude der täglichen Variationen, d. h. der Winkel zwischen dem östlichsten und westlichsten Stande, ist veränderlich; sie ist manchmal nur 5 bis 6 Minuten, manchmal aber beträgt sie auch fast $1/2$ Grad.

Auch die Inklination ist solchen täglichen Variationen unterworfen.

Sehr starke unregelmäßige Schwankungen, die oft mehr als einen Grad betragen, macht die Deklinationsnadel, wenn sich ein Nordlicht am Himmel zeigt.

Erdbeben und vulkanische Eruptionen wirken gleichfalls auf die Magnetnadel; jedoch rührt die Störung nicht von plötzlichen Änderungen der Rich-

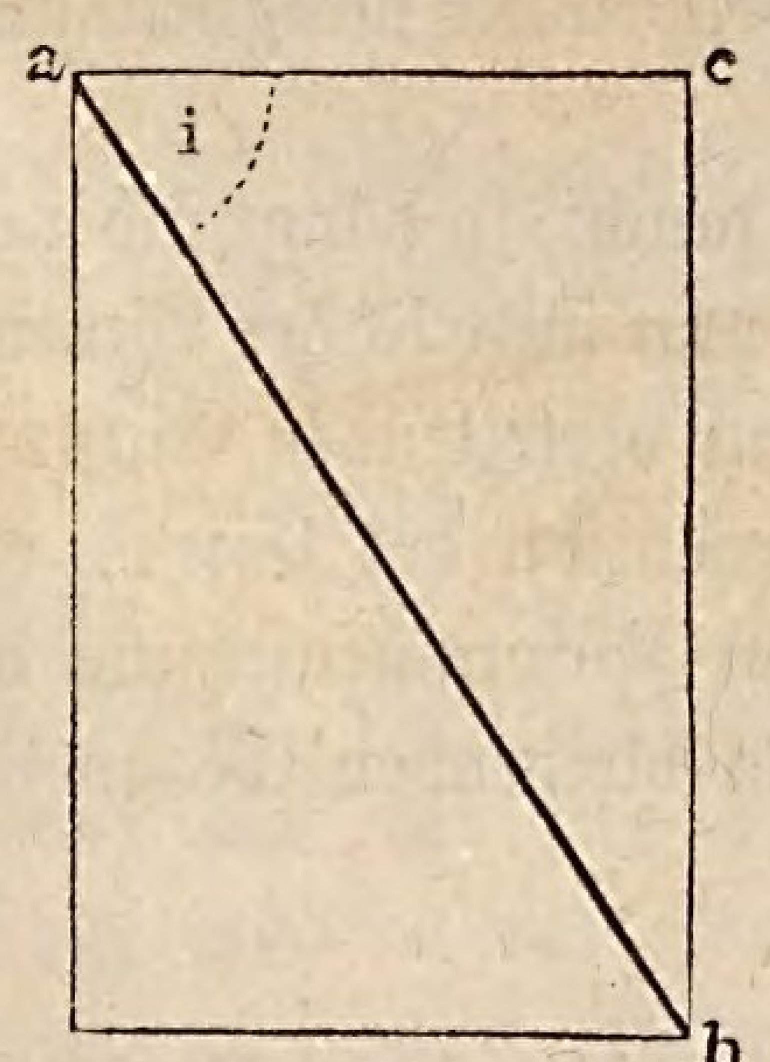
tung und der Intensität des Erdmagnetismus, sondern von den mit jenen Erscheinungen verbundenen mechanischen Erschütterungen her.

Intensität des Erdmagnetismus. Wenn eine Inklinationsnadel aus ihrer Gleichgewichtslage herausgebracht wird, so strebt der Erdmagnetismus, sie wieder in dieselbe zurückzuführen, und zwar kommt die Nadel, wenn man sie ganz und gar sich selbst überläßt, erst nach einer Reihe von Schwingungen zur Ruhe. Die Zeit, welche zu einer jeden dieser Schwingungen nötig ist, hängt ab von der Masse und der Gestalt der Nadel, von der Stärke des in ihr vorhandenen Magnetismus und von der Stärke des Erdmagnetismus. Eine und dieselbe Nadel wird um so schneller schwingen, je stärker der Erdmagnetismus auf sie einwirkt. 188

So hat man denn ein Mittel, die Intensitäten des Erdmagnetismus an verschiedenen Orten der Erde mit einander zu vergleichen; man hat nur zu beobachten, wie viele Schwingungen in einer bestimmten Zeit, etwa in 5 Minuten, eine und dieselbe Inklinationsnadel an verschiedenen Orten macht. Nach diesen Beobachtungen läßt sich dann berechnen, wie sich die Intensität des Erdmagnetismus an dem einen Orte zu der am andern Orte verhält, da, wie die Mechanik zeigt, sich die Intensitäten des Erdmagnetismus wie die Quadrate der Schwingungszahlen der Nadel verhalten.

Die Beobachtung der Oscillationen einer Inklinationsnadel kann wegen der unvermeidlichen Reibung in den Zapfenlagern nie sehr genaue Resultate geben, und deshalb sind die Schwingungsversuche mit an Coconfäden aufgehängten horizontalen Nadeln vorzuziehen. Die Kraft, welche die Deklinationsnadel oscilliren macht, ist jedoch nur ein Teil und zwar die horizontale Seitenkraft der ganzen, in der Richtung der Inklinationsnadel wirkenden magnetischen Erdkraft; wenn aber die horizontale Intensität und die Größe der Inklination bekannt ist, so kann man leicht die totale Intensität berechnen.

Fig. 382.



Stellt nämlich ab, Fig. 382, die Größe und Richtung der ganzen magnetischen Erdkraft dar, die wir mit I bezeichnen wollen und i die Inklination, also den Winkel, den die Richtung der erdmagnetischen Kraft mit dem Horizonte bildet, so ist ac die horizontale Seitenkraft, welche wir mit X bezeichnen wollen, und man hat alsdann:

$$I = X : \cos i.$$

Wenn man die Resultate der Intensitätsbestimmungen zusammenstellt, welche an verschiedenen Orten der Erdoberfläche gemacht worden sind, so ergiebt sich das allgemeine Resultat, daß die totale Intensität in der Nähe des magnetischen Äquators am kleinsten ist und daß sie von da gegen die Pole hin wächst. In der Nähe der magnetischen Pole ist sie ungefähr 1,5 mal so groß als am Äquator. An einem und demselben Orte ist aber auch die totale Intensität

veränderlich und wie die Deklination und Inklination täglichen Variationen unterworfen.

189 **Einfluss des Erdmagnetismus auf das Eisen.** Wenn man eine 60 bis 100 cm lange Stange von weichem Eisen in die Richtung der Inklinationsnadel hält, so wird sie durch den Einfluß des Erdmagnetismus selbst magnetisch, und zwar wird ihr unteres Ende ein Nordpol, ihr oberes ein Südpol, wie man leicht sehen kann, wenn man eine kleine empfindliche Magnetnadel bald dem oberen, bald dem unteren Ende der Stange nähert. Kehrt man den Stab um, so sind sogleich auch seine Pole umgekehrt; das untere Ende ist wieder ein Nordpol, das obere wieder ein Südpol.

Dieselbe Wirkung, nur etwas schwächer, bringt auch der Erdmagnetismus auf eine vertikal hängende Eisenstange und überhaupt auf jede Eisenstange hervor, welchen Winkel sie auch mit der Richtung der Inklinationsnadel macht; nur ist die Wirkung um so geringer, je mehr sie sich von der Richtung der Inklinationsnadel entfernt. Denselben Einfluß äußert der Erdmagnetismus auch mehr oder weniger auf alle Eisenmassen; alles weiche Eisen muß also unter dem Einflusse des Erdmagnetismus einen polaren Magnetismus annehmen, der sich je nach den Umständen mehr oder weniger deutlich nachweisen läßt.

Wenn eine eiserne Stange durch den verteilenden Einfluß des Erdmagnetismus zum Magneten gemacht ist, so reichen einige Schläge mit dem Hammer hin, um den Magnetismus zu fixiren und die Stange zu einem bleibenden Magnet zu machen; durch das Schlagen wird also dem Eisen eine Koërcitivkraft erteilt, welche hindert, daß die durch den Einfluß der Erde im Eisen erzeugte magnetische Polarität sich wieder verliert. Dadurch erklärt sich auch, daß fast alle Werkzeuge in der Werkstatt eines Schlossers Magnete sind.

Es scheint, daß auch chemische Veränderungen ähnlich wirken wie mechanische Erschütterungen, um den durch die Erde erzeugten Magnetismus des Eisens zu fixieren; denn man findet, daß Eisenstangen, welche längere Zeit vertikal standen und in dieser Stellung rosteten, einen bleibenden Magnetismus erhalten haben.

Wenn man einen Hufeisenmagnet in Eisenfeilspäne taucht, so hängt sich zwischen den Polen ein Bündel derselben an. Wenn man sie nun mittels der Lötrohrflamme zum Glühen erhitzt, während sie noch immer dem verteilenden Einflusse des Magnets ausgesetzt sind, so geht eine teilweise Oxydation des Eisens vor sich. Man erhält so eine ziemlich kompakte Masse, deren Zusammensetzung der der natürlichen Magnete ähnlich ist und welche ebenfalls bleibenden Magnetismus zeigt.

190 **Abnahme der magnetischen Kraft mit der Entfernung.** Nachdem wir die magnetische Wirkung der Erde kennen gelernt haben, können wir nun auch untersuchen, nach welchem Gesetze die Stärke der magnetischen Anziehungen und Abstoßungen mit wachsender Entfernung abnimmt. Es läßt sich wohl von vornherein vermuten, daß die magnetischen Wirkungen,

wie alle anderen von einem Punkte ausgehenden Wirkungen im umgekehrten Verhältnisse des Quadrates der Entfernung stehen, d. h. daß in 2-, 3-, 4mal größerer Entfernung die Wirkung eines einzelnen Magnetpoles 4mal, 9mal, 16mal kleiner ist. Bezeichnen wir mit c die Wirkung, welche ein Magnetpol auf die Entfernung 1 ausübt, so ist demnach die Wirkung v, welche er auf die Entfernung r ausübt:

$$v = \frac{c}{r^2}$$

oder auch

$$vr^2 = c,$$

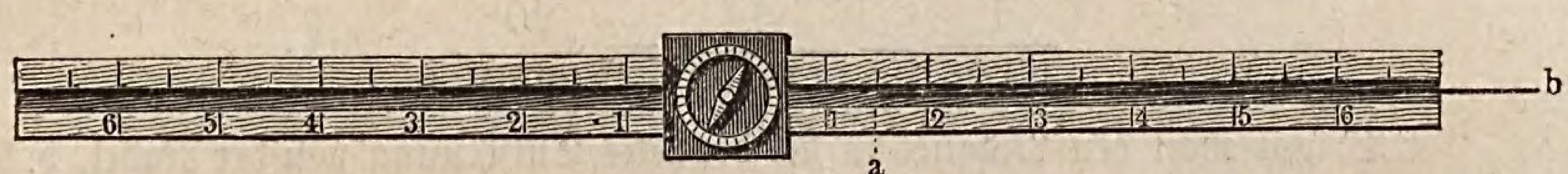
d. h. für einen und denselben Magnetpol ist das Produkt vr^2 eine konstante Größe.

Wenn man dies Gesetz durch den Versuch prüfen will, so begegnet man der Schwierigkeit, daß eben jeder Magnet zwei Pole hat, daß also die Wirkung eines jeden Poles durch die des anderen modifiziert wird. Um diesen Übelstand möglichst zu beseitigen, muß man mit Magnetstäben experimentieren, die so lang sind, daß die Wirkung des zweiten Pols auf einen in der Nähe des ersten befindlichen Punkt fast unmerklich ist. Am einfachsten läßt sich der Versuch in folgender Weise anstellen:

Auf die Mitte eines geteilten Stabes von 14 bis 20 dm Länge, welcher rechtwinklig zum magnetischen Meridian liegt, wird eine kleine Bussole so aufgesetzt, daß sich die Nadel auf den Nullpunkt der Teilung einstellt, so lange nur der Erdmagnetismus auf dieselbe einwirkt.

Nähert man nun aber von der Seite her der Bussole einen langen dünnen Magnetstab *ab*, Fig. 383, so erfolgt eine Ablenkung der Nadel, welche aber,

Fig. 383.



wenn der Magnet *ab* mindestens 1 m lang ist, nur von dem genäherten Pole *a* herrührt, weil die Einwirkung des Poles *b* auf die Nadel fast unmerklich ist. Ein Maß für die Wirkung v des Magnetpoles a ist aber die Tangente des Ablenkungswinkels u, d. h. es ist $v = tang\, u$. Für den Magnet *ab* wurde ein 1 m langer, $1\frac{1}{2}$ mm dicker, normal magnetisierter Stahldraht benutzt. Er wurde so gelegt, daß der Reihe nach die Ablenkung u gerade 2, 4, 8 Grad betrug und für jede dieser Ablenkungen die entsprechende Entfernung r des Magnetpols a von der Mitte der Nadel gemessen. Folgendes sind die zusammengehörigen Werte von v und r, welche der Versuch ergab:

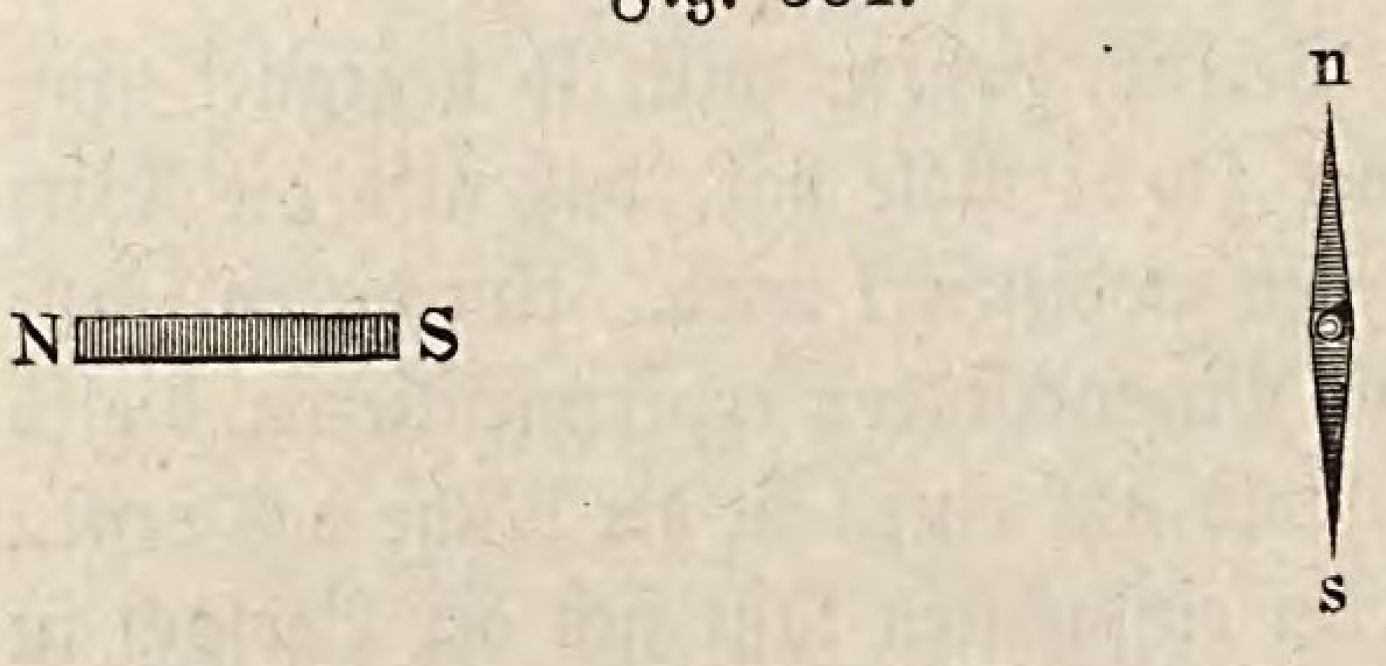
u	$v = tang\, u$	r	vr^2
2^0	0,0349	3,12 dm	0,339
4^0	0,0699	2,21 „	0,341
8^0	0,1405	1,54 „	0,332

Diese Werte des Produktes $v r^2$ sind aber so nahe gleich, daß diese Versuche in der That eine Bestätigung des oben ausgesprochenen Gesetzes liefern.

Weber hat diesen Satz auf indirektem Wege bewiesen, indem er nicht die Wirkung eines einzelnen Poles, sondern die Wirkung des ganzen Magnets in größerer Entfernung untersuchte. Er hat gezeigt, daß wenn ein Magnetstab klein ist im Vergleiche mit der Entfernung, auf welche er wirkt, die Totalwirkung desselben im umgekehrten Verhältnisse der dritten Potenz der Entfernung abnehmen muß, wenn die Wirkung eines einzelnen Poles wirklich im umgekehrten Verhältnisse des Quadrates der Entfernung steht.

In Fig. 384 sei NS ein Magnetstab von 1 dm Länge, dessen Mitte 10 dm westlich vom Mittelpunkte der kleinen Magnetnadel ns entfernt ist.

Fig. 384.



Die Magnetnadel sei so klein, daß die Länge Ss nicht merklich größer ist, als die Entfernung von S bis zur Mitte der Nadel, so ist $Ss = 9{,}5$ dm und Ns ist 10,5 dm. Bezeichnet man mit 1 die Kraft, mit welcher sich die Pole S und s in der Entfernung von 1 dm abstoßen, so ist jetzt die abstoßende Kraft $\frac{1}{9{,}5^2} = \frac{1}{90{,}25}$, wenn die Wirkung des Poles im umgekehrten Verhältnisse des Quadrates der Entfernung steht. Aus derselben Voraussetzung ergiebt sich für die anziehende Wirkung zwischen den Polen N und s der Wert $\frac{1}{10{,}5^2} = \frac{1}{110{,}25}$; die Totalwirkung, welche der Magnet NS auf s ausübt, ist also:

$$\frac{1}{90{,}25} - \frac{1}{110{,}25} = \frac{20}{9950}.$$

Bringt man den Magnet in die doppelte Entfernung von der Nadel, d. h. legt man ihn so, daß $Ss = 19{,}5$ und $Ns = 20{,}5$ ist, so muß nun die Totalwirkung des Magnets NS auf den Pol s sein:

$$\frac{1}{19{,}5^2} - \frac{1}{20{,}5^2} = \frac{1}{380{,}25} - \frac{1}{420{,}25} = \frac{40}{159800}.$$

Wenn man also die Mitte des Magnetstabes aus der Entfernung von 10 dm in die Entfernung von 20 dm bringt, so muß seine Wirkung im Verhältnisse von $\frac{20}{9950}$ zu $\frac{40}{159800}$ abnehmen. Es ist aber

$$\frac{20}{9950} : \frac{40}{159800} = \frac{1598}{199} = 8;$$

in der doppelten Entfernung ist also die Totalwirkung des Magnets 8 mal schwächer, 8 aber ist die dritte Potenz von 2.

Was hier an einem speciellen Beispiele gezeigt wurde, läßt sich auch allgemein beweisen; es läßt sich allgemein darthun, daß die Totalwirkung eines Magnets im umgekehrten Verhältnisse der dritten Potenz der Entfernung stehen muß, wenn die Wirkung der einzelnen Pole im umgekehrten Verhältnisse des Quadrates der Entfernung steht, vorausgesetzt, daß die Dimensionen des Stabes und der Nadel klein genug sind im Vergleich zu ihrer gegenseitigen Entfernung.

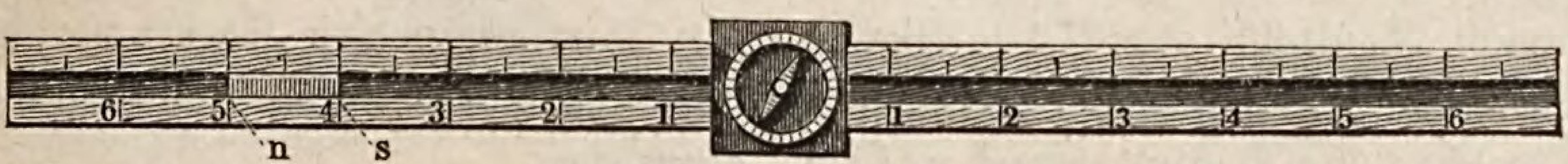
Bezeichnen wir also mit γ die Wirkung eines kurzen Magnetstabes auf die Entfernung 1, so ist seine Wirkung φ auf die Entfernung r:

$$\varphi = \frac{\gamma}{r^3}, \text{ also auch } \varphi r^3 = \gamma,$$

d. h. für einen und denselben Magnetstab ist φr^3 eine konstante Größe (vorausgesetzt, das r groß ist gegen die Länge des Magnetstabes).

Zur experimentellen Bestätigung dieses Satzes kann man die schon auf S. 365 besprochene Vorrichtung gebrauchen, wenn man statt des magnetischen Drahtes ab ein kurzes Magnetstäbchen ns, Fig. 385, östlich oder westlich von

Fig. 385.



der Bussole auf den geteilten Stab auflegt. Mit einem 1 dm langen, 1 cm dicken und ebenso breiten Magnetstab wurden folgende zusammengehörige Werte von r (Entfernung der Mittte des Magnetstabes von der Mitte der Bussole) und u (Ablenkung der Bussolennadel) beobachtet:

r	u	$\varphi = tang\, u$	φr^3
6 dm	2,1⁰	0,0367	7,93
5 „	3,8⁰	0,0664	8,05
4 „	7,2⁰	0,1263	8,08

Das oben abgeleitete Gesetz über die Totalwirkung eines Magnetstabes in die Ferne findet also durch diese Versuche seine volle Bestätigung.

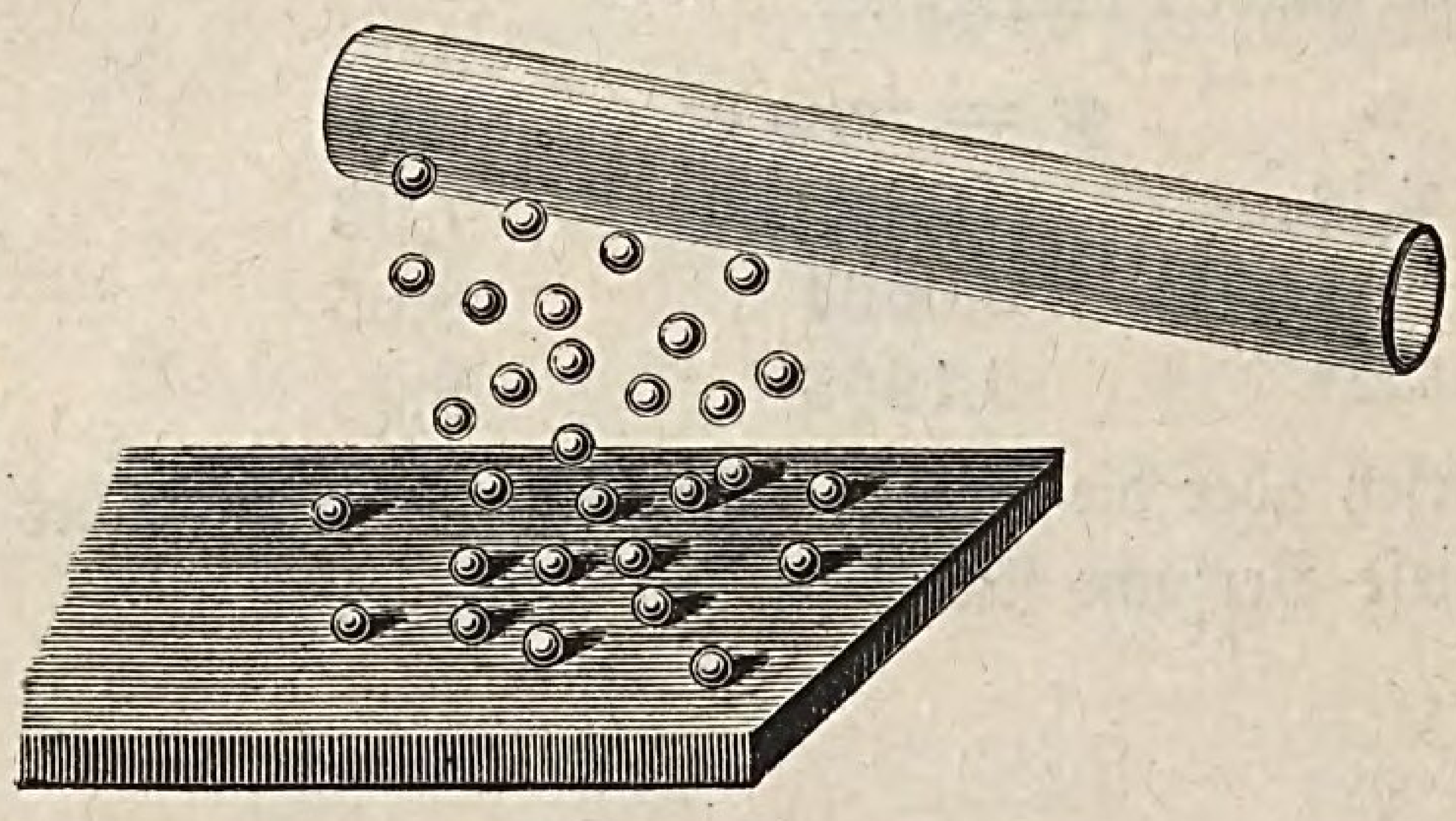
Zweites Kapitel.

Von der Reibungselektricität.

191 **Erregung der Elektricität durch Reiben.** Wenn man mit Wollen- oder amalgamiertem Seidenzeug einen Glasstab, eine Porzellanröhre, eine Stange Schwefel, Harz oder Siegellack, ein Stück Bernstein, Hartgummi, Kautschuk oder Gutta-Percha reibt, so erlangen diese Körper vorübergehend die merkwürdige Eigenschaft, leichte Gegenstände, wie Papierschnitzel, Kügelchen von Hollundermark u. s. w., anzuziehen.

Wenn man Kügelchen von Hollundermark auf einen Tisch oder noch besser auf eine Metallplatte legt und dann eine geriebene Glas- oder Harzstange darüber hält, so sieht man, wie die Kügelchen nach derselben auffliegen, Fig. 386, und nach Berührung der Stange wieder von derselben abgestoßen werden. Die Kraft, welche diese Erscheinung bewirkt, wird mit dem Namen der Elektricität bezeichnet.

Fig. 386.



Zur Erkennung des elektrischen Zustandes dienen verschiedene Apparate, welche Elektroskope genannt werden; die einfachsten derselben sind das elektrische Pendel und die elektrische Nadel. Jenes besteht aus einem Hollundermarkkügelchen, welches an einem Seidenfaden aufgehängt ist, (Fig. 387), diese dagegen aus einem Metallstäbchen *AA* (Fig. 388), welches in zwei kleine Metallkugeln endigt und in der Mitte mit einem Hütchen versehen ist, mittels dessen das Stäbchen, wie eine Deklinationsnadel, auf eine von einem Glasfuße getragene Metallspitze aufgesetzt werden kann. Nähert man dem Markkügelchen oder der Nadel einen elektrisierten Körper, so werden sie angezogen, einige Zeit festgehalten und hierauf abgestoßen.

Fig. 387.

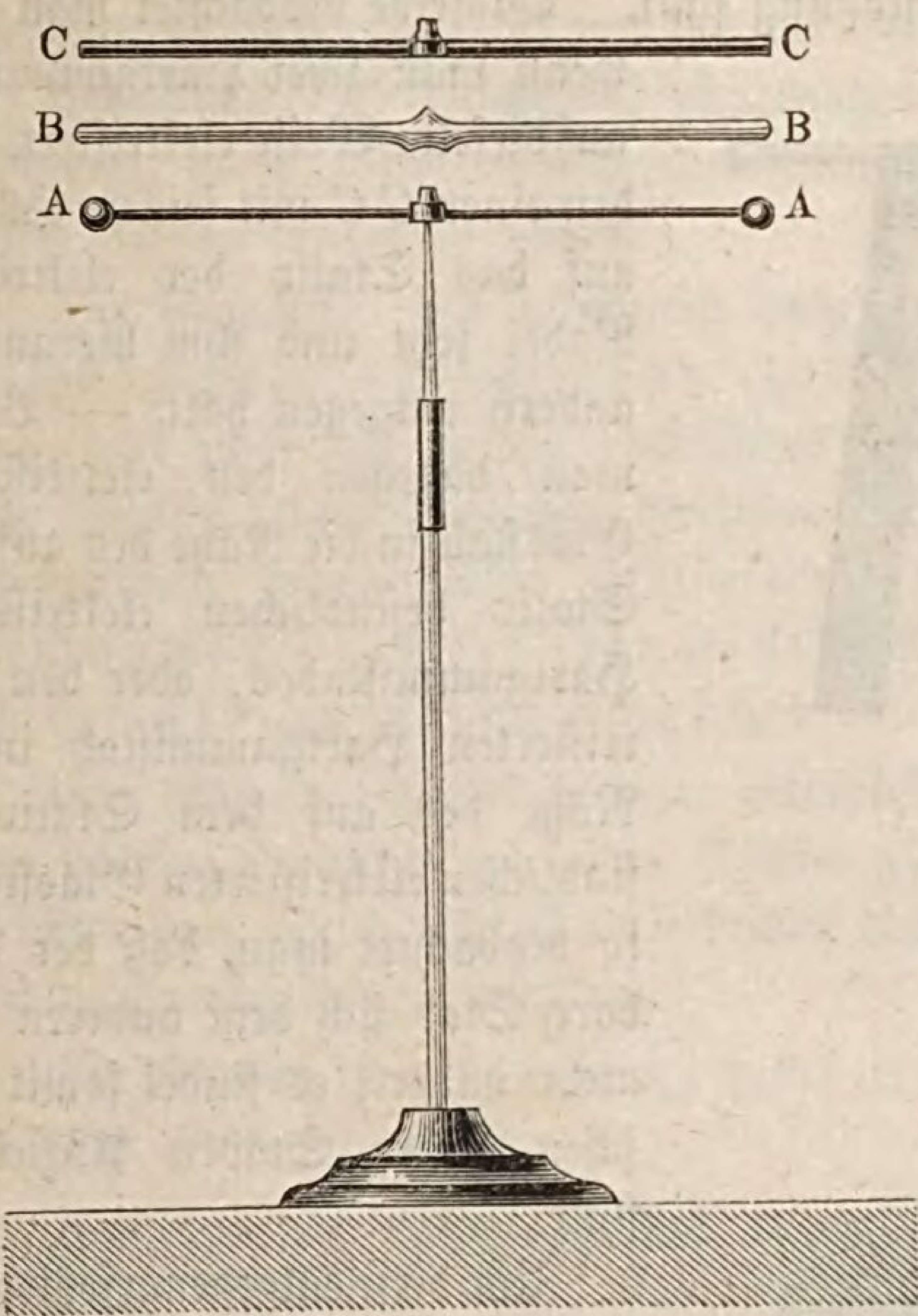
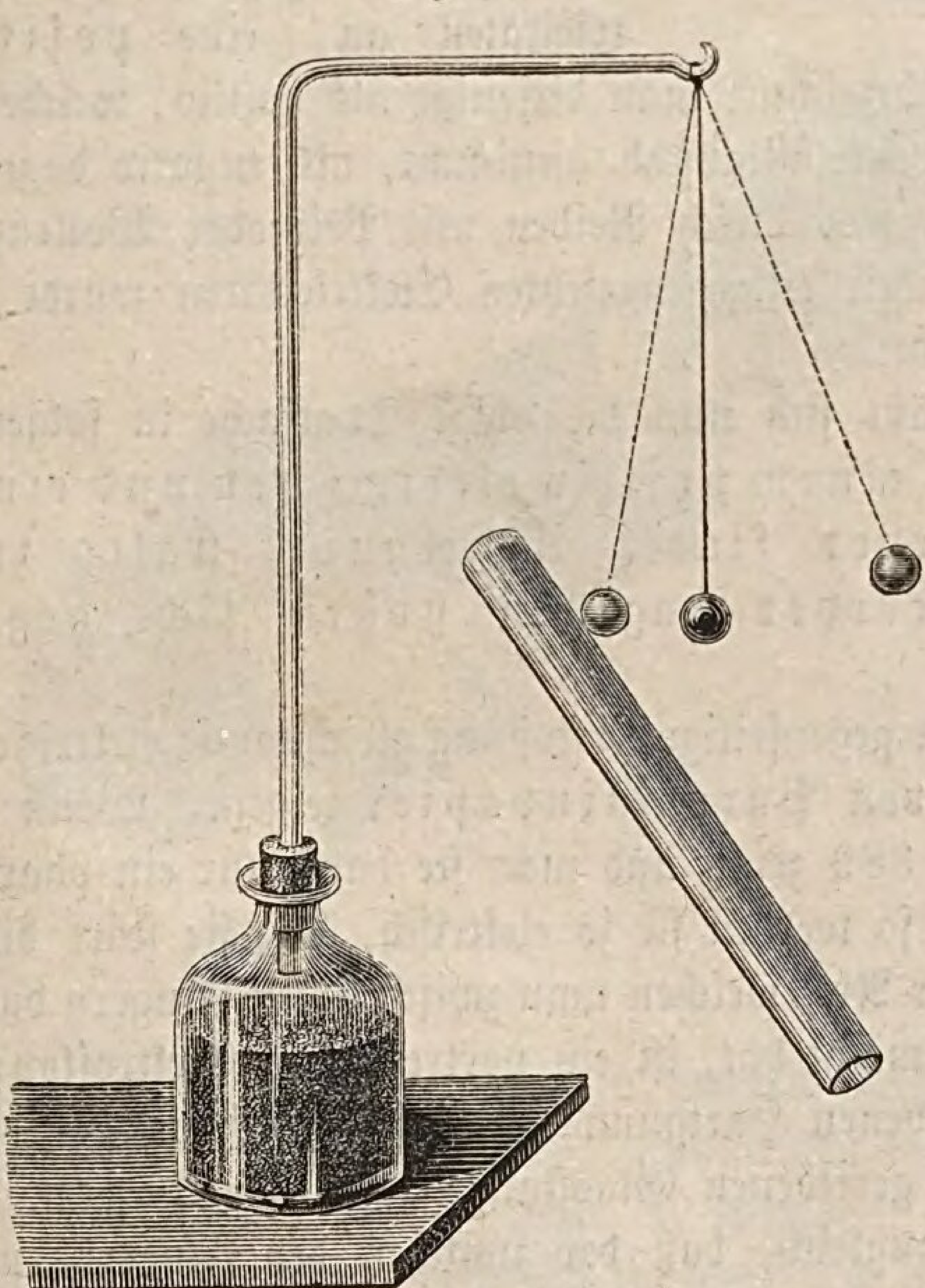


Fig. 388.



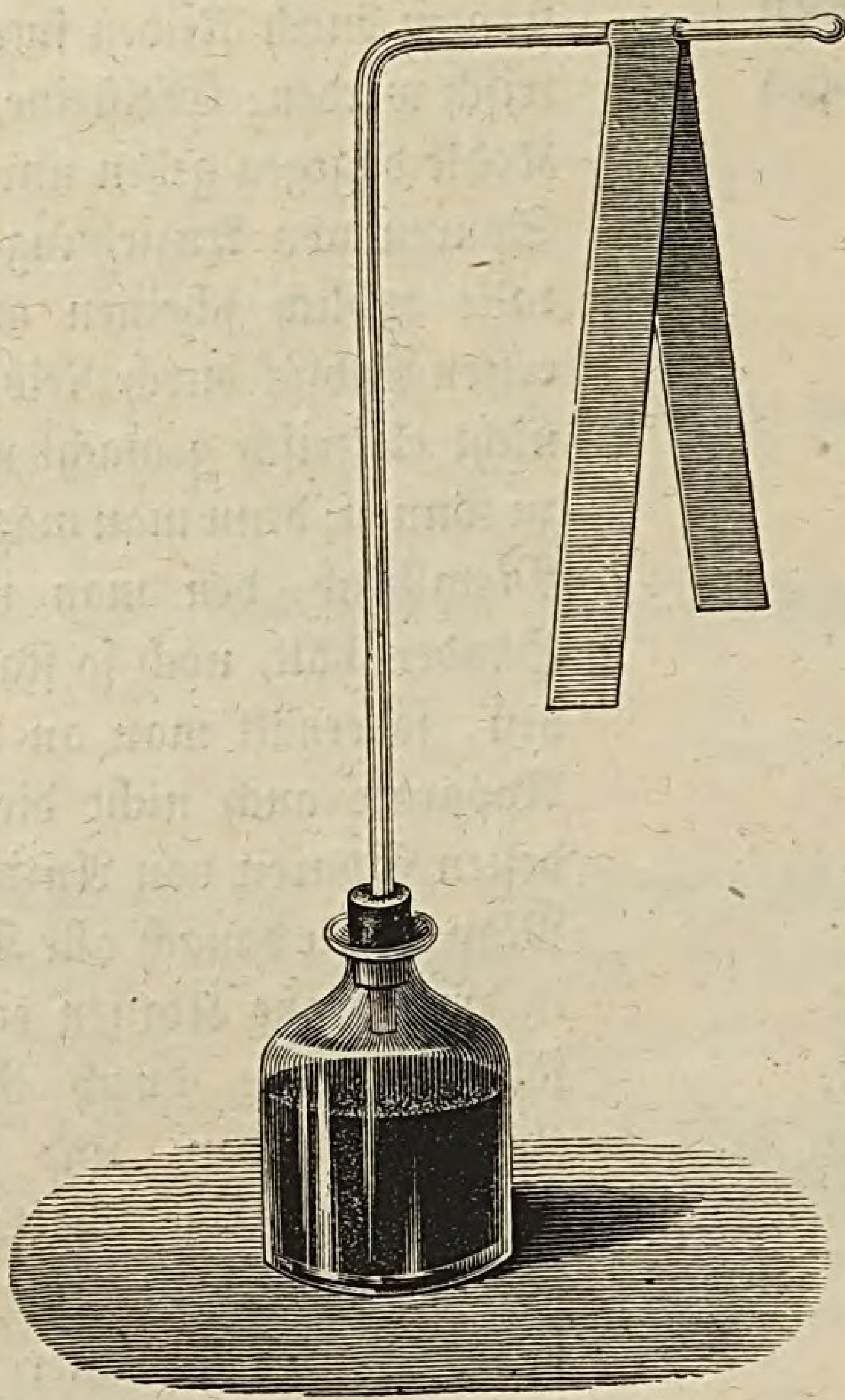
Mit Hülfe des elektriſchen Pendels läßt ſich zeigen, daß alle oben ſchon genannten Subſtanzen durch Reiben ſtark elektriſch werden; Edelſteine, Holz, Kohle dagegen geben nur ſelten Spuren von Anziehung; Metalle endlich ſcheinen auf den erſten Anblick durch Reiben gar nicht elektriſch gemacht werden zu können; denn man mag einen Metallſtab, den man in den Händen hält, noch ſo ſtark reiben, ſo erhält man an dieſem Apparate auch nicht die mindeſten Spuren von Anziehung. Man theilte danach alle Körper in zwei große Klaſſen ein: in ſolche, welche durch Reiben elektriſch werden, und ſolche, welche dieſe Eigenſchaft nicht haben. Erſtere nannte man idioelektriſche, letztere aber, in der Meinung, daß ſie überhaupt nicht fähig ſeien, den elektriſchen Zuſtand anzunehmen, anelektriſche Körper.

Dieſe Einteilung iſt jedoch nicht richtig, denn man hat ſpäter gefunden, daß auch metalliſche Körper fähig ſind, unter Umſtänden, die wir bald kennen lernen werden, eine elektriſche Ladung anzunehmen.

Die beiden Arten der Elektricität. 192 Setzt man einen elektriſchen Glasſtab *BB* (Fig. 388), der in der Mitte mit einem Hütchen verſehen iſt, auf das Stativ der elektriſchen Nadel, und nähert man ihm einen anderen auf dieſelbe Weiſe elektriſierten Glas-

stab, so beobachtet man, daß der drehbare Stab dem anderen ausweicht; es findet somit zwischen beiden Stäben Abstoßung statt. Dasselbe beobachtet man auch, wenn man zwei Hartgummistäbe auf dieselbe Weise elektrisiert, dann den einen *C C* mit seinem Hütchen auf das Stativ der elektrischen Nadel setzt und ihm hierauf den andern entgegen hält. — Bringt man dagegen den elektrisierten Glasstab in die Nähe des auf dem Stativ befindlichen elektrisierten Hartgummistabes, oder den elektrisierten Hartgummistab in die Nähe des auf dem Stativ befindlichen elektrisierten Glasstabes, so beobachtet man, daß der drehbare Stab sich dem anderen noch mehr nähert; es findet somit zwischen diesen Stäben Anziehung statt.

Fig. 389.



Um diese entgegengesetzten Erscheinungen zu erklären, nimmt man zwei entgegengesetzte Elektricitäten an, eine positive und eine negative, und zwar bezeichnet man diejenige als positiv, welche ein mit amalgamierter Seide geriebener Glasstab annimmt, als negativ dagegen, diejenige, welche ein Hartgummistab durch Reiben mit Pelz oder Wollenzeug erhält. Die Entdeckung der beiden entgegengesetzten Elektricitäten wurde von Dufay im Jahre 1773 gemacht.

Nach dieser Bezeichnung läßt sich nun die obige Thatsache in folgender Weise aussprechen: Zwischen einem positiv elektrischen und einem negativ elektrischen Körper findet Anziehung statt; zwei gleichartig elektrische Körper dagegen stoßen sich gegenseitig ab.

Sehr schön auch läßt sich die gegenseitige Abstoßung gleichnamig elektrisierter Körper mittels zweier Streifen von Pyroxylinpapier zeigen. Wenn dieselben aufgehängt sind, wie Fig. 389 zeigt, und man sie dann nur ein paarmal zwischen den Fingern durchzieht, so werden sie so elektrisch, daß sie stark divergieren. Ein einzelner Streifen der Art, welchen man zwischen den Fingern durchgezogen und dadurch elektrisch gemacht hat, ist ein vortreffliches Elektroskop; er wird von einem mit Wolle geriebenen Hartgummistab abgestoßen, von einer mit amalgamiertem Seidentaffet geriebenen Glasstange aber angezogen.

Dieses Verhalten beweist zugleich, daß der zwischen den Fingern durchgezogene Streifen Pyroxylinpapier negativ elektrisch ist.

Elektrische Fluida. Die Ursache der elektrischen Anziehungs- und Abstoßungserscheinungen ist uns vor der Hand noch unbekannt. Um aber eine klare Übersicht der elektrischen Erscheinungen und ihres Zusammenhanges geben zu können, ist es unumgänglich notwendig, sich irgend eine Hypothese über das Wesen der Elektricität zu bilden. 193

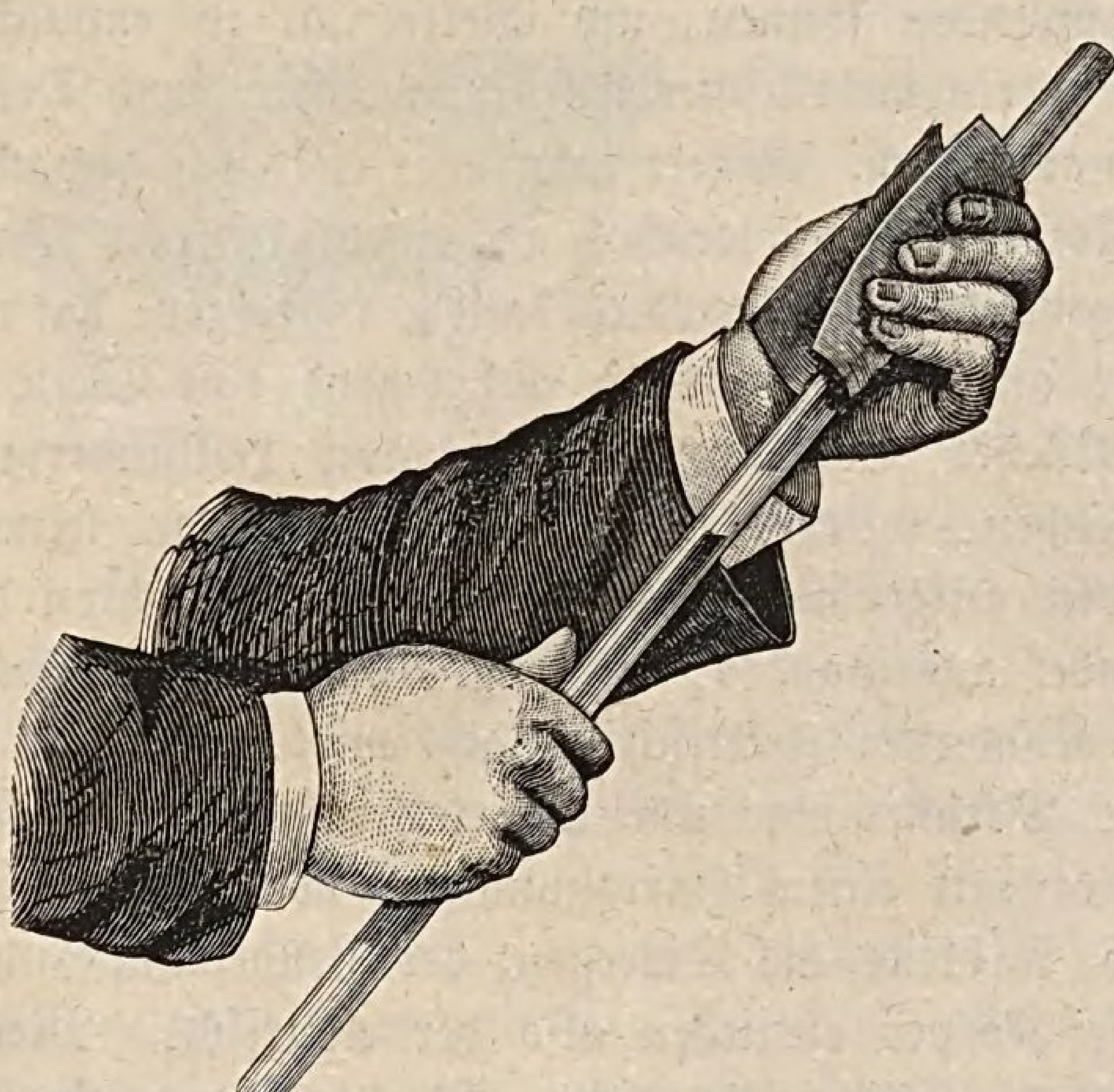
Die einfachste, fast allgemein angenommene elektrische Hypothese ist nun die, daß es zwei verschiedene elektrische imponderabele Fluida gebe, und zwar ein positiv elektrisches und ein negativ elektrisches Fluidum. Diese Fluida zeigen ähnliches Verhalten gegen einander, wie wir es bei den hypothetischen magnetischen Flüssigkeiten kennen lernten, d. h. Teilchen gleichnamiger elektrischer Fluida stoßen einander ab, ungleichnamige Fluida ziehen einander an.

Ein Körper befindet sich im natürlichen, elektrisch neutralen Zustande, wenn gleiche Quantitäten beider Fluida gleichförmig über seine ganze Masse verbreitet sind, wenn sich also die beiden elektrischen Fluida, welche der Körper enthält, gegenseitig neutralisieren.

Ein Körper ist elektrisch, wenn er einen Überschuß an positivem oder negativem Fluidum enthält.

Zwischen den elektrischen und magnetischen Flüssigkeiten findet jedoch ein wesentlicher Unterschied statt: während nämlich die magnetischen Fluida an die einzelnen Eisenteilchen gebunden sind und dieselben unter keinen Umständen verlassen können, so sind die elektrischen Fluida im Stande, von einem Körper zu einem anderen überzugehen.

Fig. 390.



Wenn durch Reiben zweier Körper an einander überhaupt Elektricität entwickelt wird, so werden beide Elektricitäten in gleichem Maße frei. Wenn der geriebene Körper positiv elektrisch wird, so wird das Reibzeug negativ und umgekehrt. Man kann dies am einfachsten dadurch zeigen, daß man einen Glasstab mit einer Platte von etwas dickem vulkanisierten Kautschuk reibt, wie dies in Fig. 390 angedeutet wird; nähert man die geriebene Seite der Kautschukplatte, indem man dieselbe nur in einem Eck zwischen zwei Fingern festhält, einem negativ elektrischen Streifen von Pyroxylinpapier, so wird derselbe abgestoßen; die Kautschuk-

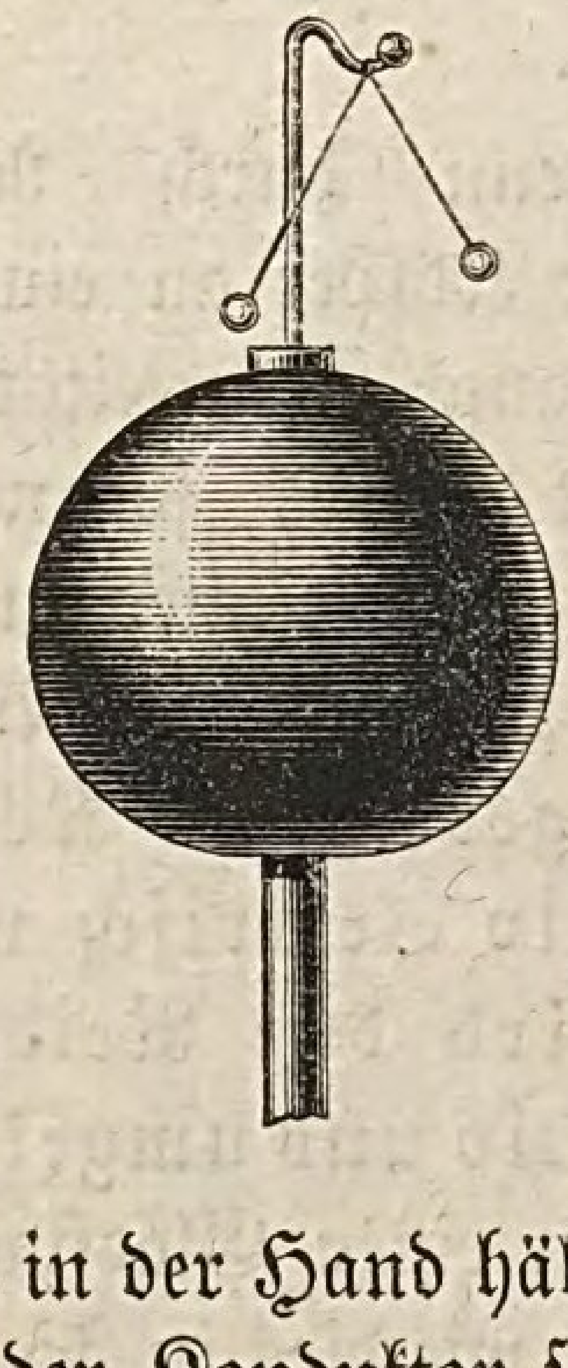
platte ist also negativ elektrisch, während der Glasstab sich als stark positiv elektrisch erweist.

Da ein Körper in seinem natürlichen Zustande die beiden Elektricitäten in gleichem Maße enthält, so giebt es keinen Grund anzunehmen, daß er besonders geeignet sei, vorzugsweise die eine aufzunehmen und zurückzuhalten; er kann also auch durch Reiben bald positiv bald negativ elektrisch werden, je nachdem man ein anderes Reibzeug wählt. So werden sowohl Glas als Hartgummi durch Reiben mit Seide positiv elektrisch und durch Reiben mit Wolle oder Katzenpelz negativ elektrisch.

194 **Leiter und Nichtleiter.** Der englische Physiker Gray fand im Jahre 1727, daß auch Metalle den elektrischen Zustand annehmen können, und zwar auf folgende Weise. Das eine Ende einer offenen Glasröhre war mit einem Korke verstopft, in welchem ein Metallstäbchen steckte; wurde nun die Röhre gerieben, so zeigte sich alsbald auch das Metallstäbchen elektrisch: ein Beweis, daß es die Elektricität aufzunehmen und fortzupflanzen vermag. Dieselbe Eigenschaft haben aber alle anelektrischen Körper; man nannte sie deshalb Leiter oder Konduktoren der Elektricität. Die idioelektrischen Körper dagegen sind keine Leiter; denn wenn man z. B. einen Glasstab durch Reiben an einem Ende elektrisch macht, so zeigt das andere Ende keine Anziehung.

Man kann diese Fundamentalwahrheit sehr gut mit Hülfe der Elektrisiermaschine nachweisen, welche wir, ohne noch ihre Einrichtung zu kennen, doch vor der Hand schon als Mittel anwenden können, um Elektricität zu entwickeln. Der Konduktor der Maschine ist ein metallischer Körper, welcher durch Drehen einer Glasscheibe elektrisch gemacht wird. Nähert man dem elektrisch gemachten metallischen Konduktor ein Korkkügelchen, welches an einem leinenen Faden aufgehängt ist, so wird es kräftig angezogen; hat man aber an dem Konduktor auf irgend eine Weise ein elektrisches Doppelpendel, d. i. zwei Hollundermarkkügelchen, welche dicht neben einander an leinenen Fäden aufgehängt sind, angebracht, so fahren diese Pendel auseinander, wie Fig. 391 andeutet, sobald der Konduktor elektrisch gemacht wird.

Fig. 391.



Berührt man nun den elektrisch gemachten Konduktor mit einem Hartgummistab oder einem Glasstab, so bleibt die Divergenz der Pendel ungeändert; diese Körper entziehen also der elektrischen Metallkugel die Elektricität nicht. Berührt man aber den Konduktor mit einem Metallstab, dessen anderes Ende man in der Hand hält, so fallen die Pendel augenblicklich zusammen: ein Beweis, daß der Konduktor seine Elektricität verloren hat. Durch den Metallstab kann also die Elektricität des Konduktors abströmen, der Metallstab ist also ein Leiter der Elektricität. Durch den Glasstab oder den Hartgummistab wird die Elektricität des Konduktors nicht abgeleitet, Glas und Hart-

gummi sind also Nichtleiter der Elektricität oder elektrische Isolatoren.

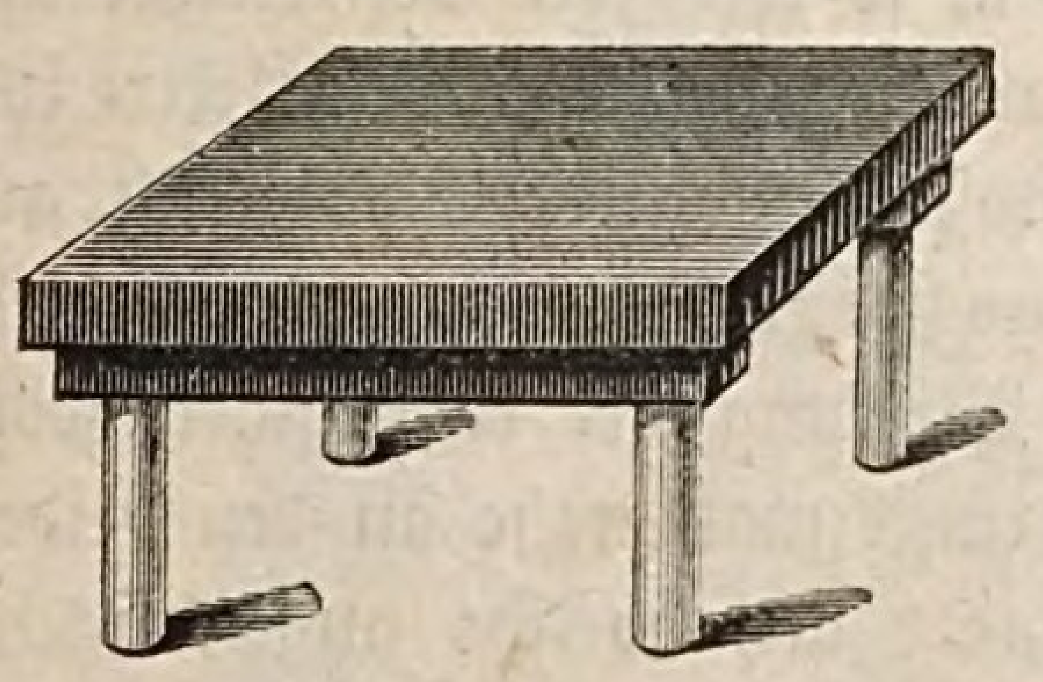
Wenn man einem Leiter eine elektrische Ladung erteilen will, so muß man ihn isolieren, d. h. man muß ihn mit lauter Isolatoren umgeben. Metallische Leiter werden deshalb auf Füße von Glas oder Hartgummi gesetzt oder an Seidenfäden aufgehängt. Die trockne Luft ist gleichfalls ein Isolator, denn sonst würde alle Elektricität, welche man einem von einem Glasfuß getragenen Leiter mitteilt, sogleich durch die umgebende Luft entweichen.

Übrigens sind die Stäbe mancher Glassorten so stark leitend, daß sie zur Konstruktion elektrischer Konduktoren völlig unbrauchbar sind.

Ein isolierter mit Elektricität geladener Leiter verliert alle Elektricität, sobald er mit dem Boden in leitende Verbindung gebracht wird, während ein Isolator unter den gleichen Umständen seine Elektricität nicht verliert. Ebenso verbreitet sich die Elektricität über die ganze Oberfläche eines isolierten Leiters, wenn man ihn auch nur in einem Punkte mit dem geladenen Konduktor der Elektrisiermaschine in Verbindung bringt; ein Isolator dagegen nimmt unter den gleichen Umständen keine merkliche elektrische Ladung an.

Der menschliche Körper ist ein guter Leiter. Wenn man, auf dem Zimmerboden stehend, den Konduktor der Elektrisiermaschine anfaßt, so wird alle Elektricität, welche durch das Drehen derselben erzeugt wird, sogleich abgeführt; wenn man aber auf einem schlechten Leiter, etwa auf einem Harzkuchen oder einer Kautschukplatte oder auf einem sogenannten Isolierschemel, Fig. 392, d. h. auf einem durch Glasfüße getragenen Brette, steht, so wird der ganze Körper elektrisch. Man sieht jetzt auch ein, warum eine Metallstange, die man in der Hand hält, durch Reiben nicht elektrisch wird; alle Elektricität nämlich, welche man durch das Reiben auf dem Metalle erzeugt, wird sogleich durch den menschlichen Körper wieder abgeführt.

Fig. 392.



Die besten Isolatoren werden Leiter, wenn sich Wasserdampf auf ihnen niederschlägt. Es ist deshalb für den Erfolg elektrischer Versuche von der größten Wichtigkeit, Glasfüße, Hartgummistäbe und Harzstangen, welche einen Leiter isolieren sollen, durch Erwärmen und Reiben gehörig trocken zu machen.

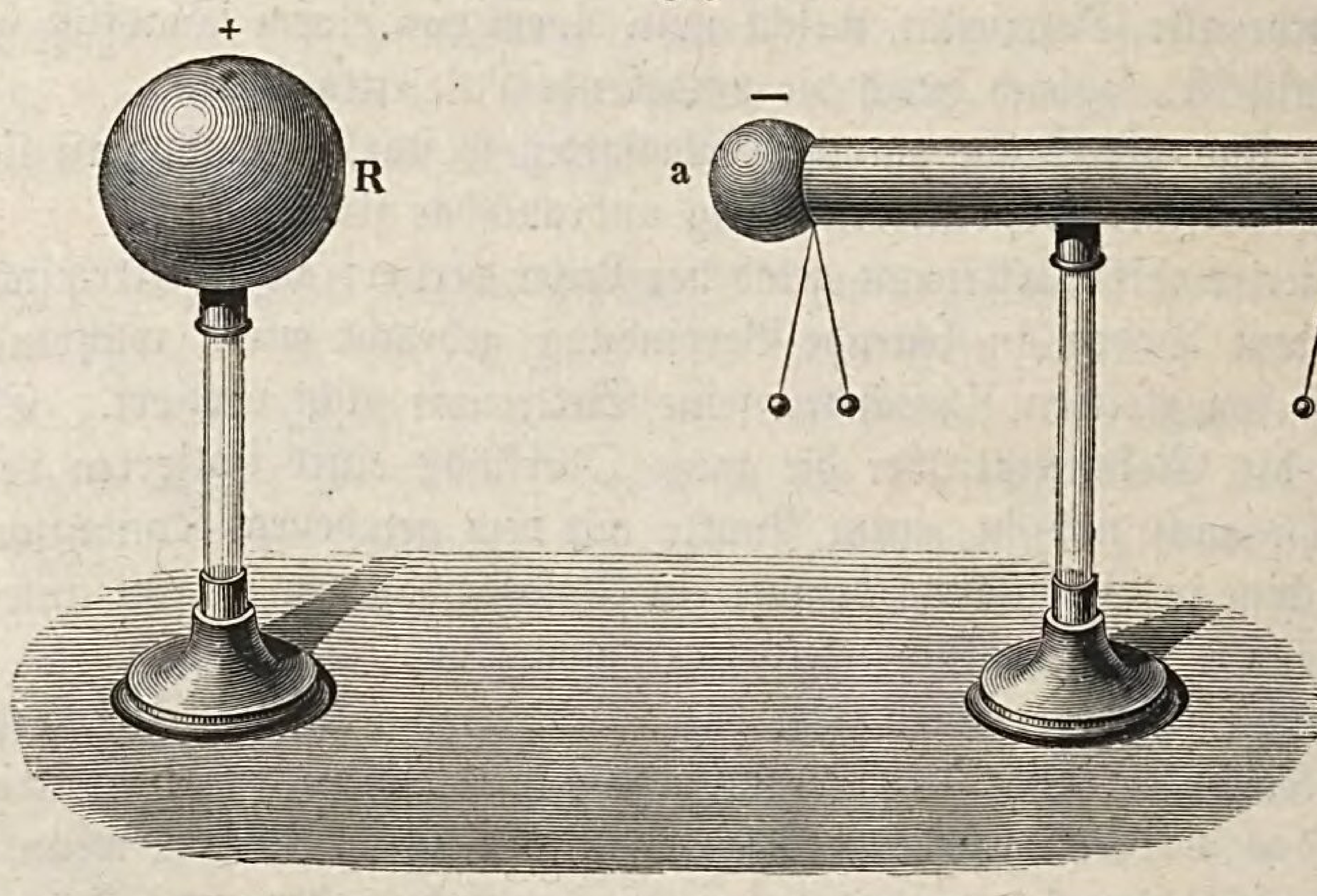
Statt die Körper in Leiter und Nichtleiter einzuteilen, müßte man sie, um genauer zu reden, gute oder schlechte Leiter nennen, denn absolute Nichtleiter giebt es nicht. Hartgummi, Schellack, alle Harze, Seide und Glas sind die schlechtesten, die Metalle hingegen sind die besten Leiter der Elektricität.

Elektrische Verteilung. Wir haben gesehen, daß jede der elek- 195
trischen Flüssigkeiten die gleichnamige abstößt und die ungleichnamige anzieht. Diese Anziehung und Abstoßung äußert sich aber nicht allein auf die schon getrennten Fluida, sondern auch auf die noch verbundenen, und daher kommt es, daß die verbundenen Elektricitäten eines Leiters, der sich im unelektrischen

Zustande befindet, durch die Annäherung eines elektrischen Körpers von einander getrennt werden. Man sagt dann, der Leiter sei durch **Verteilung** oder **Influenz** elektrisch geworden.

Dieser Satz läßt sich dadurch nachweisen, daß man einen isolierten Leiter *ab*, Fig. 393, in der Nähe eines isolierten Leiters *R*, etwa des Konduktors der

Fig. 393.



Elektrisiermaschine, aufstellt und dann diesem Leiter *R* eine elektrische Ladung erteilt. Ist *R* mit **positiver** Elektricität geladen, so wird die Elektricität auf *ab* in der Weise zerlegt, daß sich die von *R* angezogene negative Elektricität vorzugsweise bei *a* anhäuft, während die abgestoßene positive Elektricität auf die von *R* abgewendete Seite getrieben und vorzugsweise bei *b* angehäuft wird.

Um die bei *a* und *b* durch die verteilende Wirkung des elektrischen Körpers *R* frei werdende Elektricität nachzuweisen, bringt man nahe an den beiden Enden des isolierten Leiters elektrische Doppelpendel an, welche augenblicklich divergieren, sobald *R* elektrisch gemacht wird. Daß in der Nähe von *a* negative Elektricität aufgehäuft ist, vorausgesetzt, daß man *R* mit positiver Elektricität geladen hat, geht daraus hervor, daß das divergierende Pendelpaar bei *a* von einem mit Wolle geriebenen Hartgummistab abgestoßen, während das bei *b* aufgehängte Pendelpaar von demselben Stabe angezogen wird.

Wenn man den isolierten Leiter *ab* ableitend berührt, während der elektrische Körper *R* in der Nähe bleibt, so fallen die Pendel bei *b* zusammen, **weil alle abgestoßene Elektricität entweicht**; die Divergenz der Pendel bei *a* hört aber **nicht** auf, denn die von *R* angezogene Elektricität **kann nicht** abgeleitet werden, weil sie durch die anziehende Wirkung, welche *R* auf dieselbe ausübt, bei *a* gleichsam **gebunden** ist.

Entfernt man aber zunächst die ableitende Berührung und alsdann den verteilenden Körper *R*, oder entzieht man ihm seine Ladung, so kann sich nun die bis dahin bei *a* gebunden gewesene Elektricität frei über den ganzen Leiter *ab* verbreiten und gleichfalls abgeleitet werden.

Die auf einem Leiter durch Verteilung frei gewordene Elektricität wird nach Rieß auch als Influenzelektricität bezeichnet.

Das Elektrometer. Auf dem Grundsatze der elektrischen Verteilung beruht die Konstruktion eines vortrefflichen Elektroskopes. — Wenn am unteren Ende eines isolierten Metallstabes ein Paar elektrische Pendel hängen, so divergieren sie, wenn man von oben einen elektrischen Körper nähert. Um 196

Fg. 394.

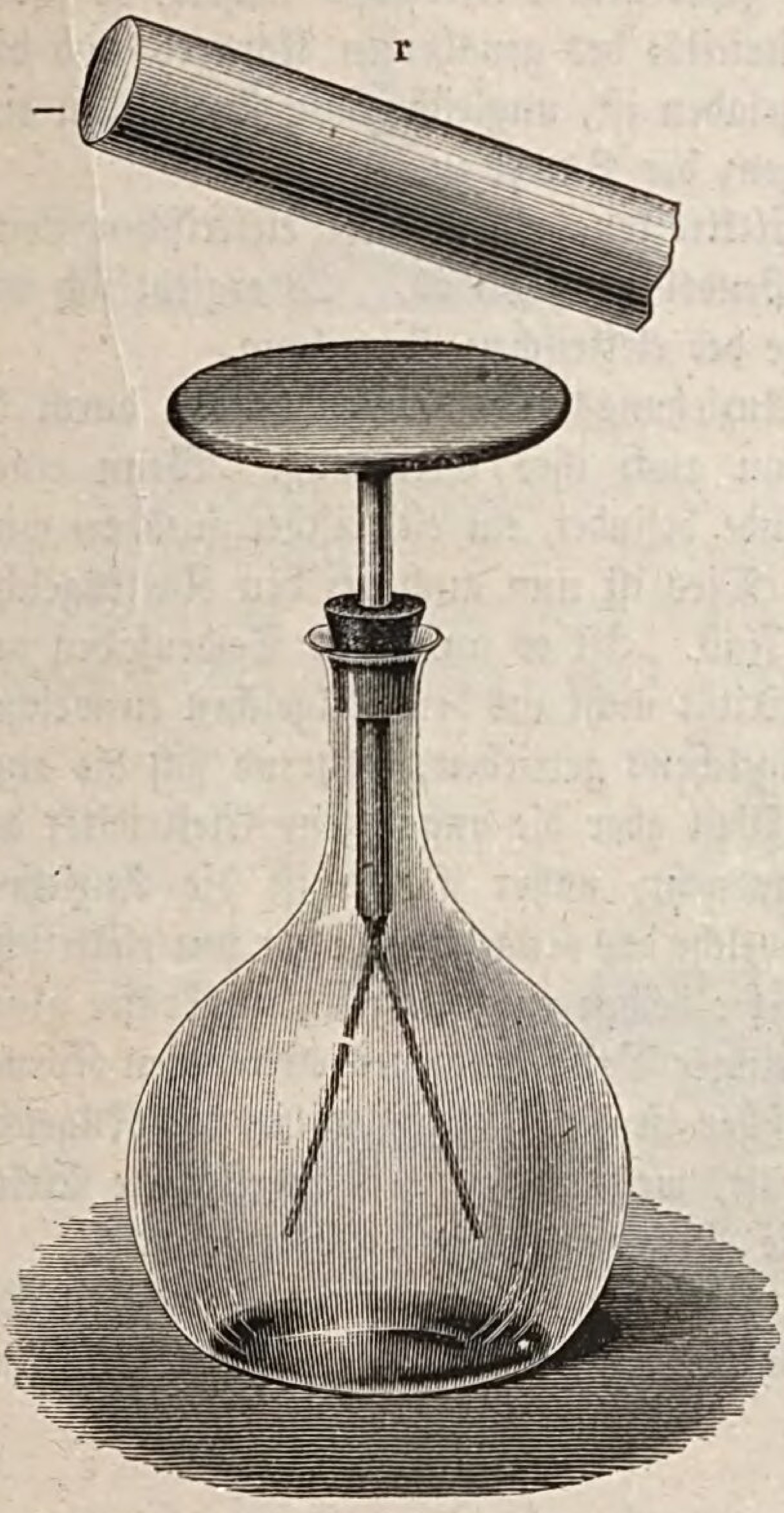
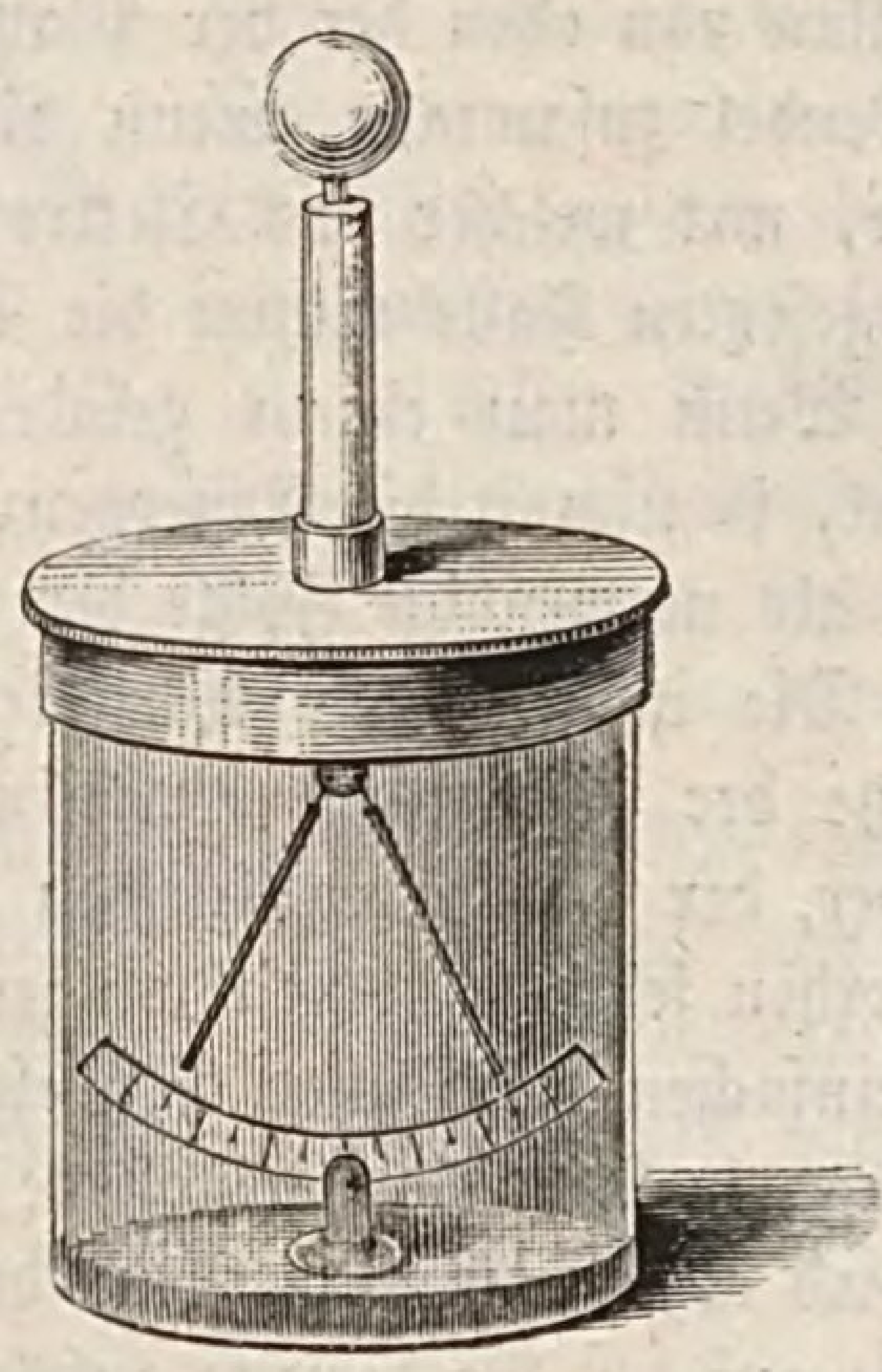


Fig. 395.



aus einer solchen Vorrichtung ein empfindliches Elektroskop zu machen, müssen die Pendel zur Abhaltung von Luftströmungen in ein Glasgefäß eingeschlossen, und dann muß das leitende System sorgfältig isoliert sein. Der Metallstab steckt deshalb in einer gefirnißten Glasröhre. Die Pendel können aus Strohhalmen oder am zweckmäßigsten aus Goldschaumstreifen bestehen.

Fig. 394 stellt ein Goldblattelektroskop dar. Wird ein solches Instrument mit einem Gradbogen versehen, welcher gestattet, die Divergenz der Pendel zu messen, so erhält man ein Elektrometer. Fig. 395 stellt ein Strohhalmelektrometer dar.

Wenn man einem Elektroskope einen elektrischen Körper, etwa einen geriebenen Hartgummistab *r*, Fig. 394, von oben her nähert, so divergieren die Pendel, weil die von *r* abgestoßene Elektricität in die Pendel herabgetrieben, die von *r* angezogene aber in die Platte des Elektroskops heraufgezogen wird.

Wenn man nun die Platte des Elektroskops ableitend berührt, so fallen

die Pendel zusammen, weil die von r abgestoßene Elektricität entweicht, die von r angezogene Elektricität dagegen in der Platte des Elektroskops gebunden wird. Entfernt man nun zunächst die ableitende Berührung und dann den elektrischen Körper r, so divergieren die Pendel aufs neue, das Elektroskop ist nun geladen und zwar mit der dem Verteiler r entgegengesetzten Elektricität.

Ein so geladenes Elektroskop dient dazu, um zu untersuchen, von welcher Natur die Elektricität irgend eines elektrischen Körpers ist. Wenn man nämlich denselben von oben her der Platte des geladenen Elektroskops nähert, so fallen die Pendel zusammen, wenn die Elektricität des genäherten Körpers und diejenige, mit welcher das Elektroskop geladen ist, ungleichnamig sind. Im entgegengesetzten Falle nimmt die Divergenz der Pendel zu.

Wenn man einem geladenen Elektroskope einen nicht elektrischen Leiter nähert, so nimmt die Divergenz der Pendel ebenfalls ab. Es ergiebt sich dies leicht als notwendige Folge der Gesetze der elektrischen Verteilung.

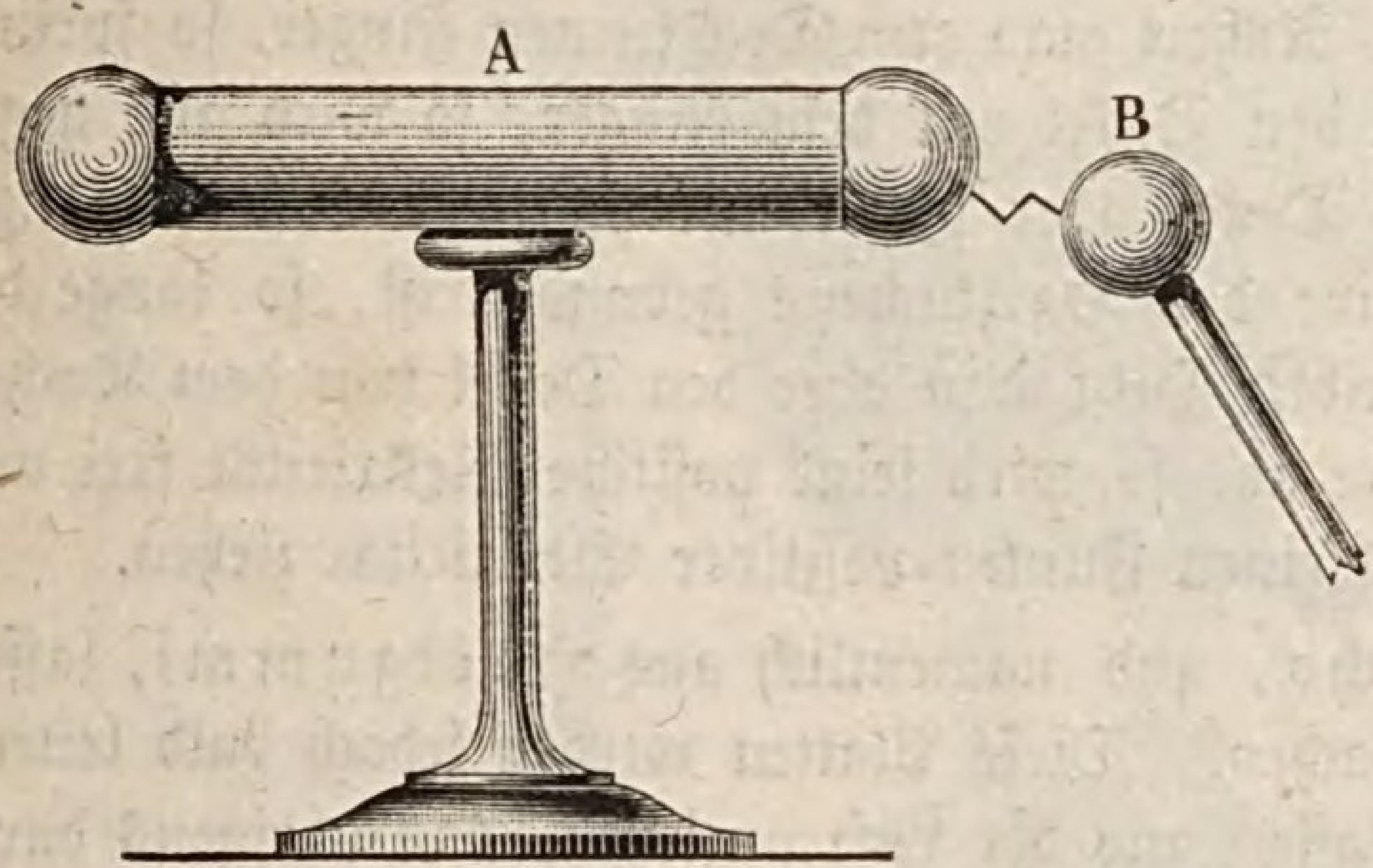
Die in §. 191 beschriebenen Anziehungserscheinungen finden durch die Gesetze der elektrischen Verteilung nun auch ihre Erklärung. Wenn einem Körper, der sich im natürlichen Zustande befindet, ein elektrischer genähert wird, so werden seine Elektricitäten zerlegt. Dies ist nun auch bei den Korkkügelchen des einfachen elektrischen Pendels der Fall. Ist es an einem Seidenfaden aufgehängt, so kann die abgestoßene Elektricität nicht aus dem Kügelchen entweichen, sie wird auf die hintere Seite des Kügelchens getrieben, während sich die angezogene auf der Vorderseite anhäuft. Weil aber die angezogene Elektricität dem Körper, von welchem die Wirkung ausgeht, näher ist, so ist die Anziehung stärker als die Abstoßung; die Kraft, welche das Kügelchen gegen den elektrischen Körper hintreibt, ist der Differenz dieser beiden entgegengesetzten Kräfte gleich; darum wird auch hier erst bei sehr geringer Entfernung des elektrischen Körpers eine Anziehung erfolgen. Weit energischer ist die Wirkung, wenn das Kügelchen an einem leinenen Faden aufgehängt ist, weil alsdann die abgestoßene Elektricität entweichen kann und durch sie die Anziehung nicht geschwächt wird.

Ein Kügelchen von Schellack wird bei Annäherung eines elektrischen Körpers nicht angezogen, weil der genäherte Körper nur sehr schwer Verteilung in demselben hervorbringen kann.

197 **Der elektrische Funken.** Wenn man einem isolierten, mit positiver oder negativer Elektricität geladenen Leiter einen anderen nicht elektrischen Leiter nähert, so geht in dem letzteren, wie wir gesehen haben, eine elektrische Verteilung vor sich, deren Stärke mit der Annäherung zunimmt. Es sei z. B. der isolierte Leiter A, Fig. 396, mit positiver Elektricität geladen worden und man nähere ihm eine metallische Kugel B, so wird sich dieselbe nur mit negativer Elektricität laden, wenn sie mit dem Boden in leitende Verbindung gesetzt ist. Die bei größerer Annäherung zwischen A und B immer wachsende Anhäufung der entgegengesetzten Elektricitäten auf den einander zugekehrten Stellen der beiden Leiter bewirkt, daß die Anziehung derselben endlich so stark wird,

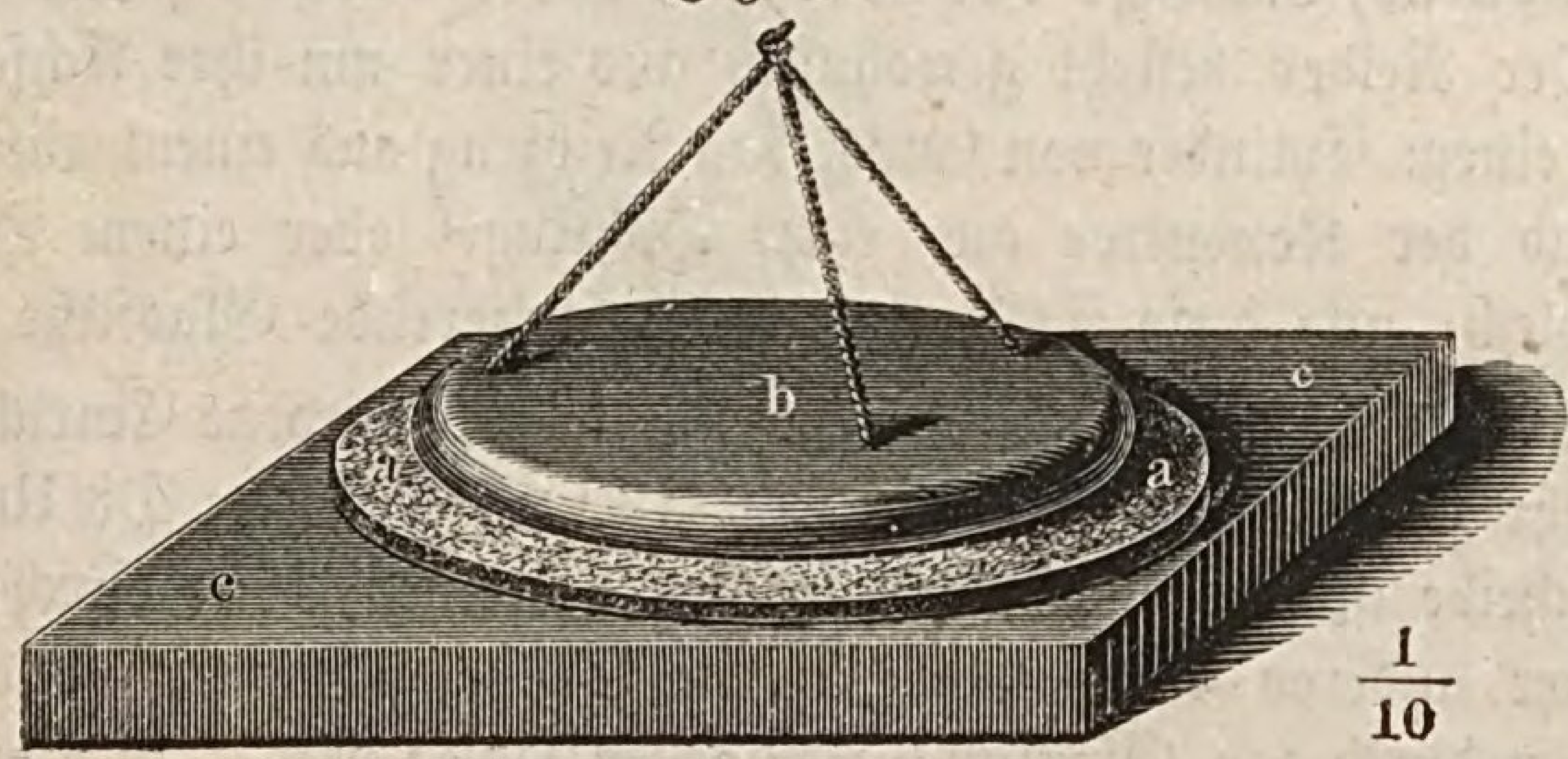
daß ihre teilweise Vereinigung schon vor sich geht, ehe noch A und B in unmittelbare Berührung kommen, indem die isolierende Luftschicht, welche sie noch trennt, durchbrochen wird. Ein solcher Übergang der entgegengesetzten Elektricitäten von einem Leiter zum andern ist dann stets mit einer Lichterscheinung, dem **elektrischen Funken**, begleitet, während sich zugleich ein mehr oder minder starkes Knacken hören läßt. Die Erscheinung des elektrischen Funkens wird weiter unten noch näher besprochen werden.

Fig. 396.



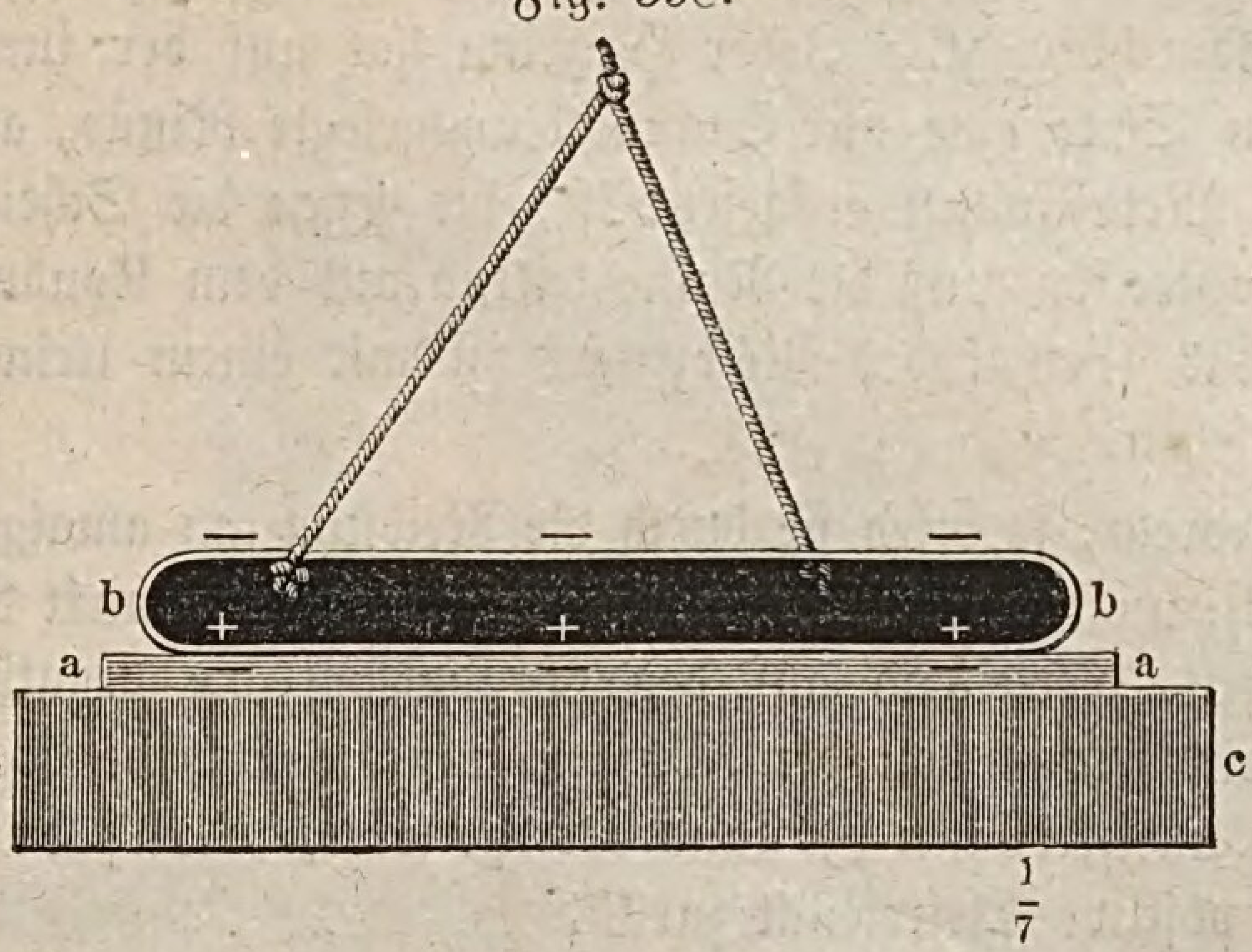
Das Elektrophor ist einer der wichtigsten elektrischen Apparate und 198
kann in vielen Fällen selbst die Elektrisiermaschine ersetzen. Es besteht aus einem Harzkuchen mit möglichst ebener Oberfläche, welcher in eine metallene Form, gleichsam einen Teller von Metall, gegossen ist, oder, wie Fig. 397 zeigt, aus

Fig. 397.



einem Harzkuchen a, den man nur auf eine etwas größere Metallplatte oder ein mit Stanniol überzogenes Brett c auflegt. Auf diesen Kuchen, dessen Oberfläche durch Schlagen mit einem Fuchsschwanze oder einem Katzenpelze vorher negativ elektrisch gemacht wird, setzt man einen durch isolierende seidene Schnüre getragenen Deckel b von Me-

Fig. 398.



tall platt auf. Die negative Elektricität des Harzkuchens wirkt verteilend auf die bis dahin noch verbundenen Elektricitäten im Deckel; infolge davon wird die positive Elektricität angezogen, die negative aber abgestoßen; jene wird sich deshalb im unteren, diese dagegen im oberen Teile des Deckels anhäufen, wie Fig. 398 (a. v. S.) andeutet. Nähert man dem Deckel einen Finger, so springt ein Funken über; berührt man den Deckel mit dem Finger, so wird alle negative Elektricität abgeleitet; der Deckel aber bleibt mit positiver Elektricität geladen, welche durch die negative des Harzkuchens gebunden ist, so lange der Deckel auf demselben liegen bleibt. Hebt man aber den Deckel von dem Kuchen mittels der isolierenden Schnüre ab, so wird seine positive Elektricität frei und man kann nun aus dem Deckel einen Funken positiver Elektricität ziehen.

Auch von Gutta-Percha, und namentlich aus Hartgummi, lassen sich gute Elektrophorplatten machen. Diese Platten werden jedoch bald leitend und unwirksam, indem sie Wasser aus der Luft anziehen, das übrigens durch Abwaschen der Oberfläche mit starkem Weingeist leicht wieder entfernt wird.

Ein gutes Elektrophor erhält man auch, wenn man statt des Harzkuchens etwa ein Dutzend auf einander gelegter Bogen Pyroxylinpapier anwendet und das oberste Blatt mit wollenem Zeuge reibt.

199 **Die Elektrisiermaschine.** An der Elektrisiermaschine unterscheidet man drei Hauptteile, nämlich: den Reiber, das Reibzeug und den Konduktor. Der Reiber besteht gewöhnlich aus einer um ihre Achse drehbaren Scheibe oder einem Cylinder von Glas, das Reibzeug aus einem amalgamierten Lederkissen und der Konduktor aus einer Hohlkugel oder einem Hohlcylinder von Messingblech; alle diese Teile sind durch isolierende Glasfüße unterstützt.

Man hat der Elektrisiermaschine mancherlei verschiedene Einrichtungen gegeben; eine sehr zweckmäßige ist die in Fig. 399 abgebildete. Die Umdrehungsachse *l* der Scheibe ist von Glas; sie wird auf der einen Seite durch den Glasfuß *s*, auf der anderen durch eine hölzerne Stütze getragen. Die Reibzeuge stecken in einem durch den Glasfuß *h* getragenen Holzgestell. In dem Konduktor *a* steckt die Saugvorrichtung *d*; sie besteht hier aus zwei Holzringen, zwischen welchen sich die Scheibe hindurchbewegt. Jeder Holzring hat auf der inneren der Scheibe zugewandten Seite eine mit Stanniol ausgelegte Rinne, auf deren Boden eine Reihe von Metallspitzen aufgesetzt ist, die gegen die Scheibe gerichtet sind. Ein Stanniolstreifen muß die Rinne leitend mit dem Konduktor *a* verbinden. — Auch das Gestell des Reibzeuges ist mit einem kleinen messingenen Konduktor *o* versehen.

Wird die Glasscheibe gedreht, so wird sie durch die Reibung am amalgamierten Leder positiv elektrisch; an der Saugvorrichtung angekommen, wirkt die positive Elektricität der Scheibe verteilend auf den Konduktor; die negative Elektricität wird angezogen und strömt von den Spitzen auf die Scheibe über, welche dadurch wieder in den unelektrischen Zustand versetzt wird. Auf dem Konduktor *a* bleibt die positive Elektricität zurück.

Fig. 399.

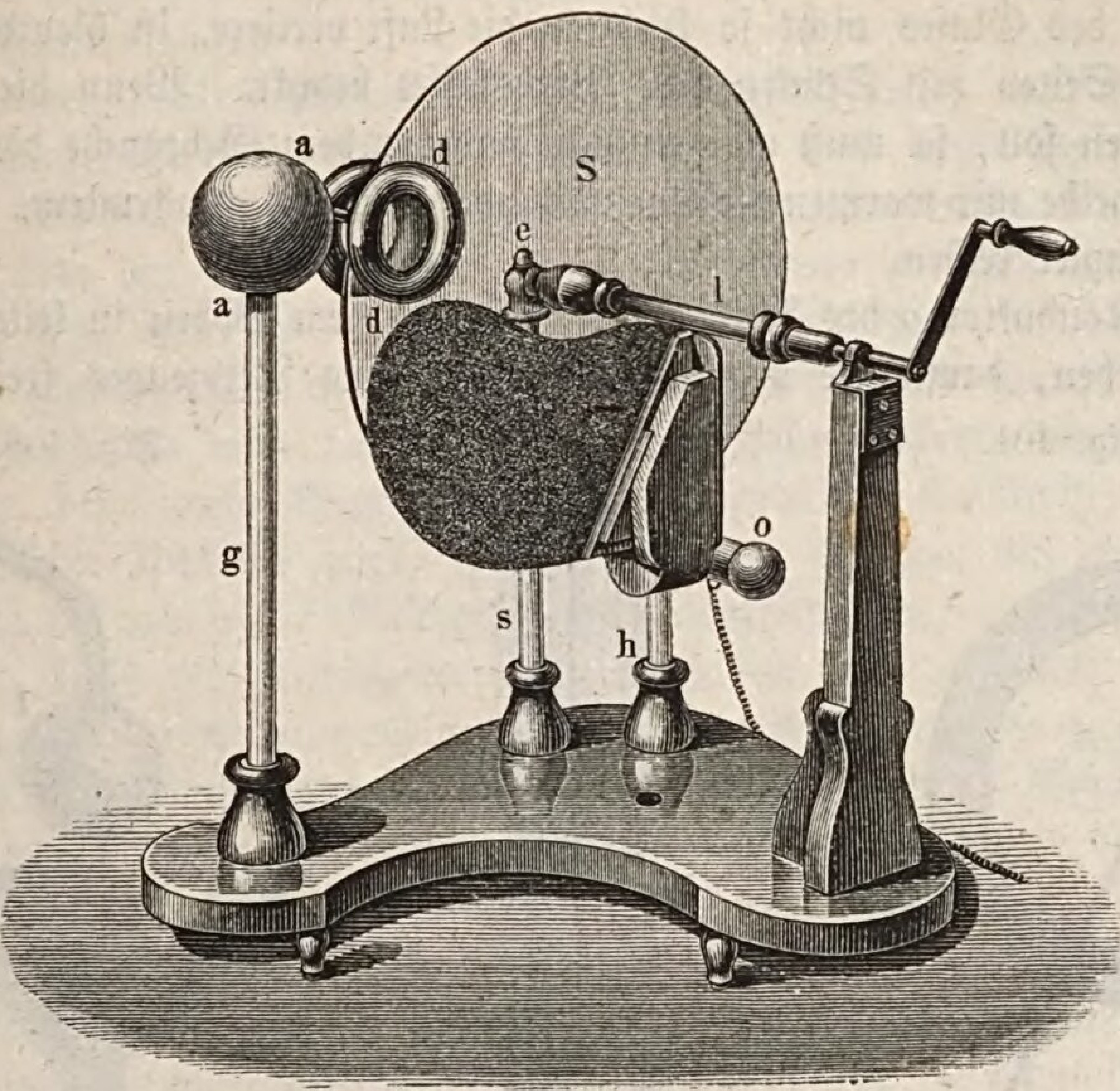
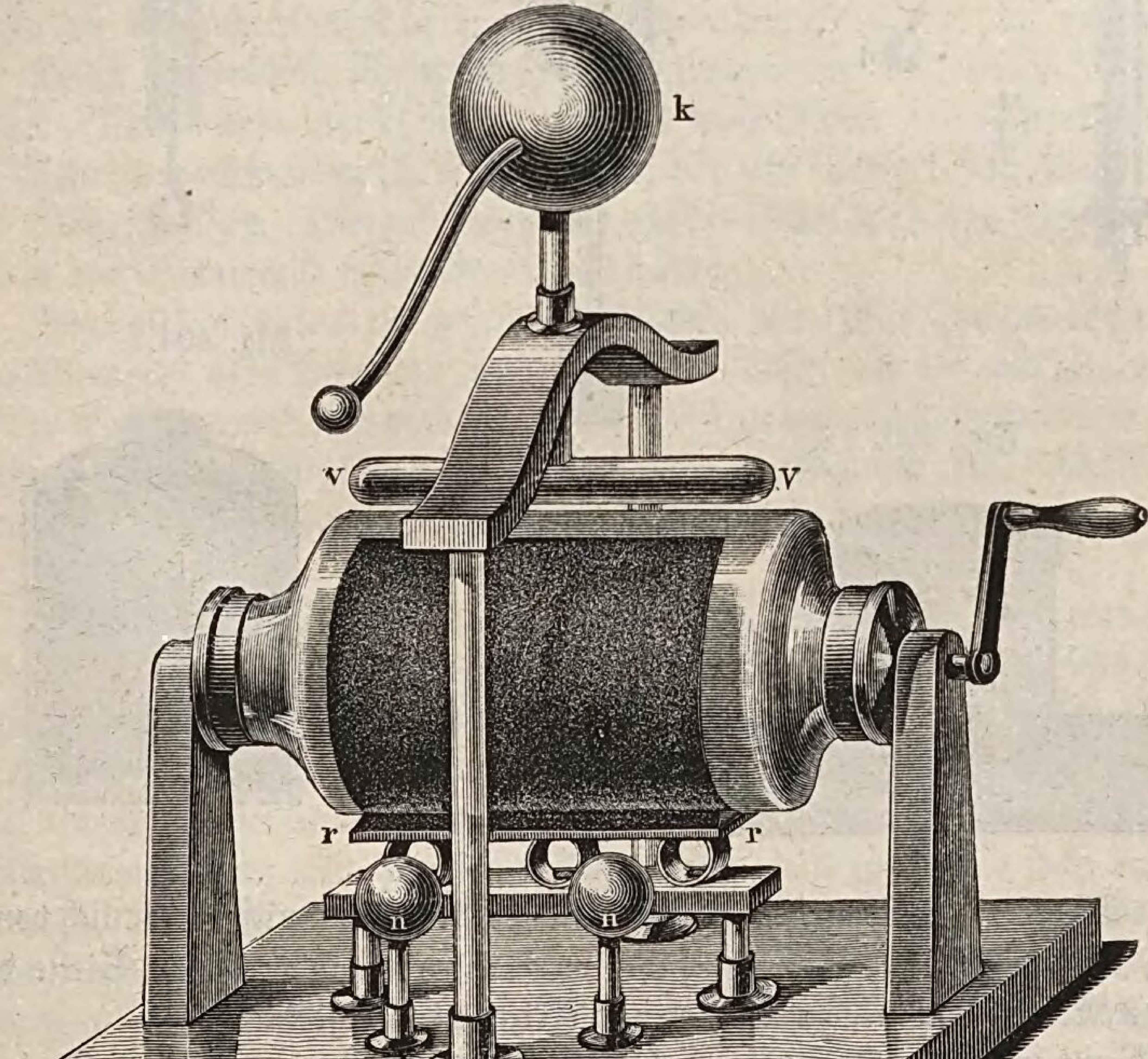


Fig. 400.



Damit sich auf dem Wege von dem Reibzeuge bis zu den Saugringen die Elektricität des Glases nicht so leicht in die Luft verliere, ist hier die Scheibe auf beiden Seiten mit Stücken von Wachstaffet bedeckt. Wenn die Maschine kräftig wirken soll, so muß man unmittelbar vor dem Gebrauche die Glasfüße und die Scheibe mit warmen wollenen Lappen oder mit gewärmtem, recht trocknem Löschpapier reiben.

Der Konduktor *o* des Reibzeuges muß mit dem Boden in leitender Verbindung stehen, damit die negative Elektricität des Reibzeuges frei abfließen

Fig. 401.

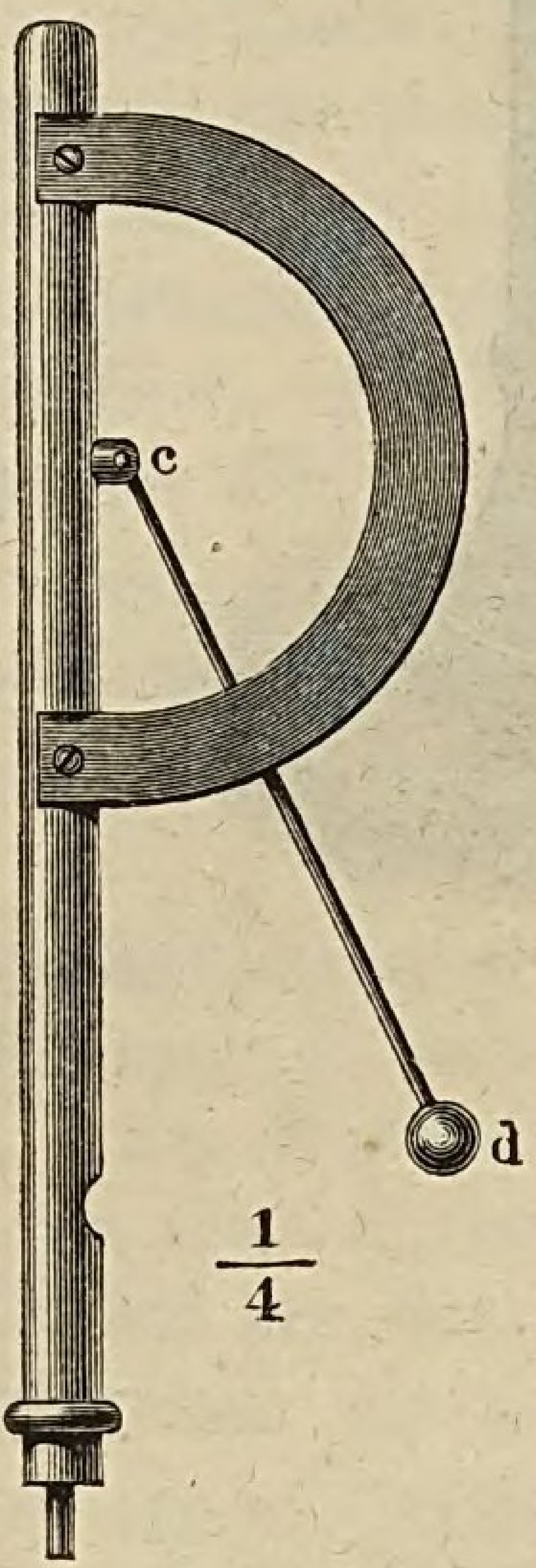


Fig. 402.

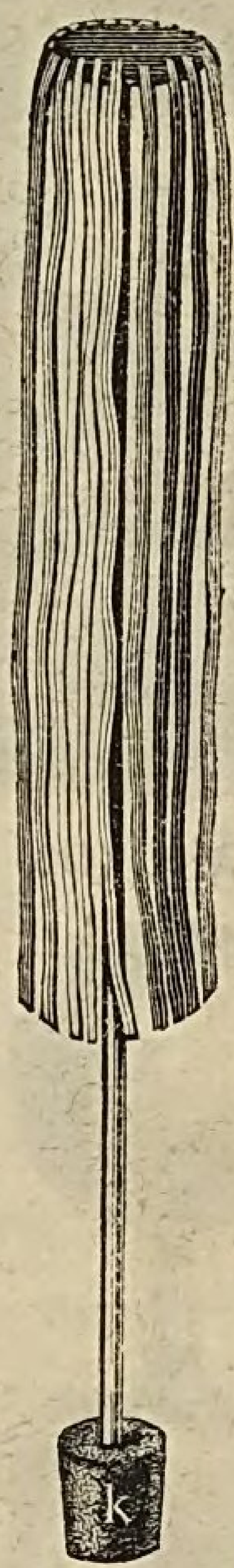


Fig. 405.

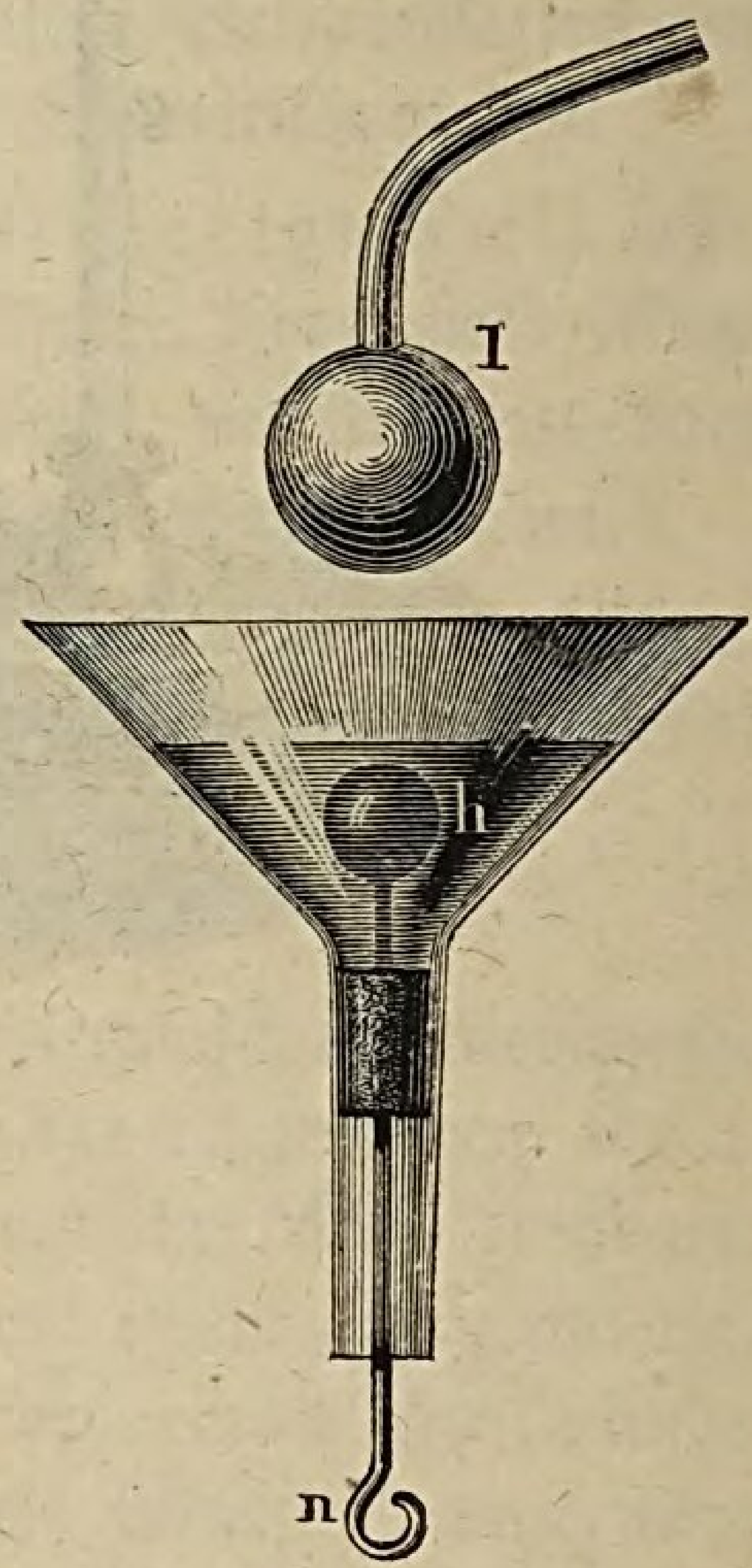


Fig. 404.

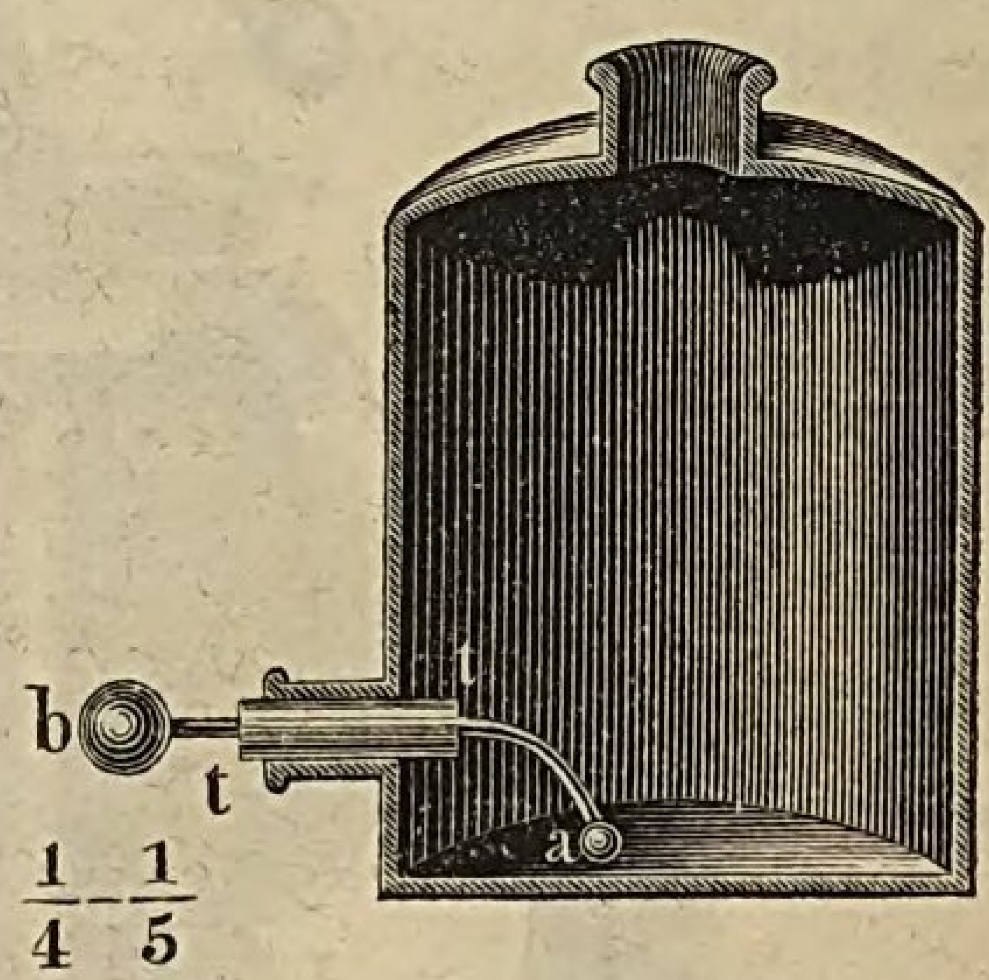
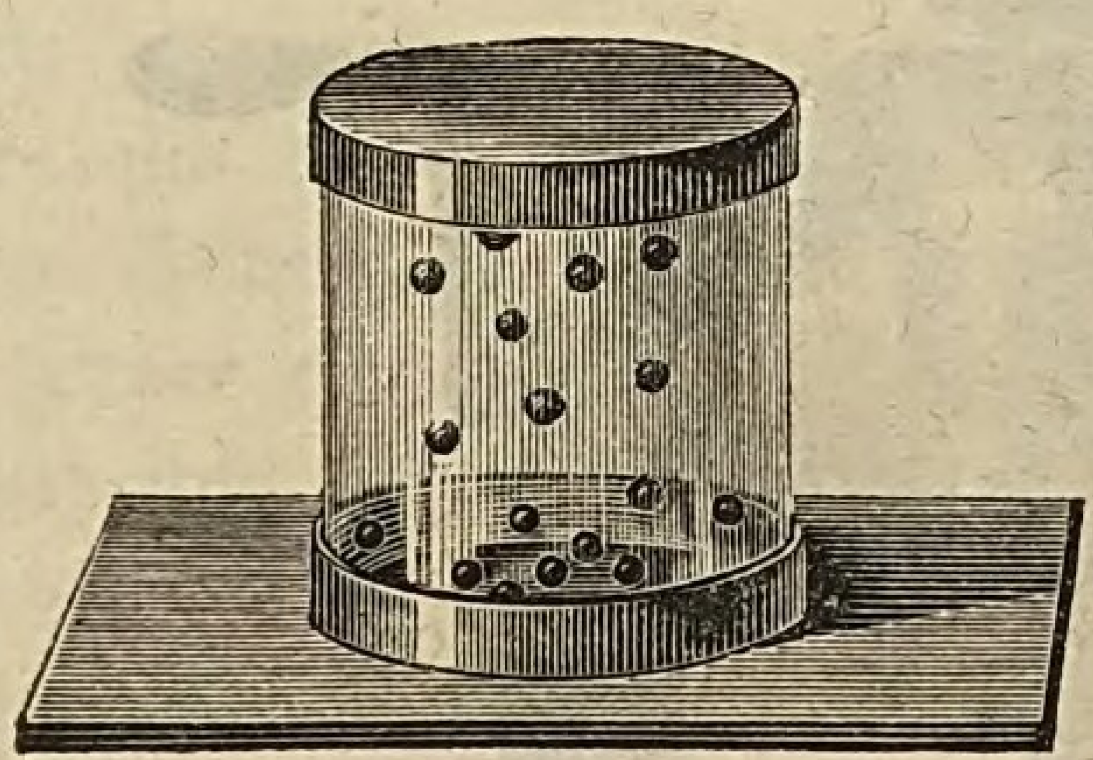


Fig. 403.



kann. Die durch Reiben frei gewordenen Elektricitäten müssen nämlich von der Stelle, wo sie frei wurden, weggeführt werden, wenn an derselben Stelle durch ferneres Reiben von neuem Elektricität erregt werden soll.

Wenn man den Konduktor des Reibzeuges isoliert, dagegen den Konduktor *a* mit dem Boden in leitende Verbindung bringt, so häuft sich auf dem Kon-

duktor des Reibzeuges negative Elektricität an, und man kann aus ihm negativ elektrische Funken ziehen.

Statt der Glasscheiben wendet man, wie schon bemerkt, auch Glascylinder zur Konstruktion von Elektrisiermaschinen an. Eine solche Cylindermaschine stellt Fig. 400 dar, welche wohl ohne weitere Erläuterung verständlich sein wird.

Um über den Grad der Ladung des Konduktors einigermaßen ein Urteil zu haben, setzt man das Quadrantenelektrometer auf denselben auf, dessen Einrichtung schon aus der Fig. 401 klar wird. Je stärker die Ladung wird, desto stärker wird das an einem Strohhalm steckende Korkkügelchen *d* abgestoßen, desto mehr steigt es. An einem geteilten Halbkreise, den unsere Figur von der Rückseite zeigt, kann man sehen, um wie viel Grade sich der Strohhalm *cd* von seiner Gleichgewichtslage entfernt hat.

Mit Hülfe der Elektrisiermaschine lassen sich die elektrischen Anziehungs- und Abstoßungserscheinungen in mannigfachen Abänderungen zeigen. Steckt man z. B. das Metallstäbchen, Fig. 402, welches oben ein Scheibchen trägt, von dem schmale Papierstreifen herabhängen, auf den Konduktor, so werden sich dieselben schirmartig ausbreiten, wenn die Maschine gedreht wird. — Fig. 403 stellt einen Glascylinder von 10 bis 15 cm Durchmesser dar, welcher oben und unten mit einer Metallplatte endigt; auf der unteren, welche gut abgeleitet ist, liegen einige Hollundermarkkügelchen, die obere ist durch eine Metallkette mit dem Konduktor der Elektrisiermaschine verbunden. Sobald die Maschine gedreht wird, tanzen die Kügelchen zwischen dem oberen und unteren Deckel auf und ab.

Leicht entzündliche Gegenstände werden durch den elektrischen Funken entzündet. Schon der einfache Funke des Elektrophors oder noch sicherer der Funke der Elektrisiermaschine entzündet Knallgas, d. i. ein Gemisch von Sauerstoffgas und Wasserstoffgas. Hierauf beruht die elektrische Pistole (Fig. 404) und das in der Gasanalyse gebrauchte Eudiometer.

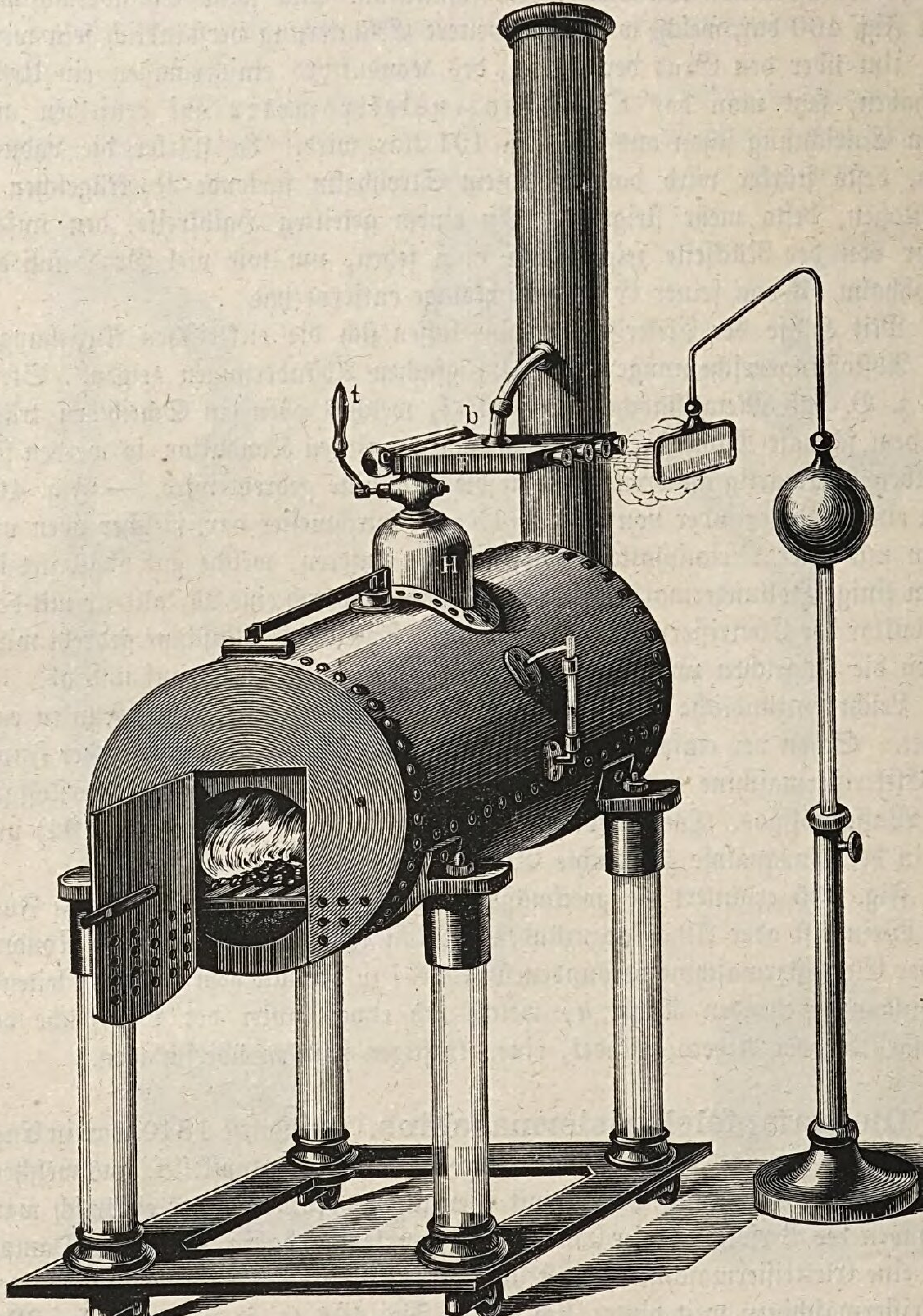
Fig. 405 erläutert die zweckmäßigste Art, mit Hülfe des elektrischen Funkens Weingeist oder Äther anzuzünden. Man läßt von der mit dem Konduktor der Elektrisiermaschine verbundenen Kugel *l* zu der mit dem Boden in leitende Verbindung stehenden Kugel *h*, welche sich etwas unter der Oberfläche des Weingeistes oder Äthers befindet, einen kräftigen Funken überschlagen.

Die Dampfelektrisiermaschine. Im Jahre 1840 war in England zufällig die Entdeckung gemacht worden, daß ein Dampfkessel, aus welchem 200
durch eine kleine Öffnung Dampf mit Gewalt hervordrang, stark elektrisch war; durch weiteres Verfolgen dieser Entdeckung gelangte man dahin, aus einem Dampfkessel eine Elektrisiermaschine herzustellen, deren Wirkung alle bis dahin bekannten Elektrisiermaschinen weit hinter sich ließ. Fig. 406 (a. f. S.) stellt eine Maschine der Art von mittlerer Größe dar. Der Dampfkessel, welcher 44 cm im Durchmesser hat und 96 cm lang ist, ruht auf vier Glasfüßen. Die Feuerung ist inwendig in der Weise wie bei den Dampfkesseln auf Dampfschiffen angebracht.

Oben auf dem Dampfkessel befindet sich ein Hut, auf welchem ein kurzes durch einen Hahn verschließbares Messingrohr befestigt ist; auf dieses kurze

Rohr können dann die Ausströmungsöffnungen aufgeschraubt werden, die sogleich näher beschrieben werden sollen.

Fig. 406.



Vor dem Hute sieht man ein Sicherheitsventil, dessen Gewicht verschiebbar ist, und welches so weit herausgerückt werden kann, daß der Dampf einen Druck von 6 bis 7 Atmosphären ausüben muß, um das Ventil zu heben.

Fig. 407 zeigt den von oben gesehenen Apparat mit den Ausströmungsöffnungen, welcher auf den Dampfkessel aufgeschraubt wird. Zunächst tritt

Fig. 407.

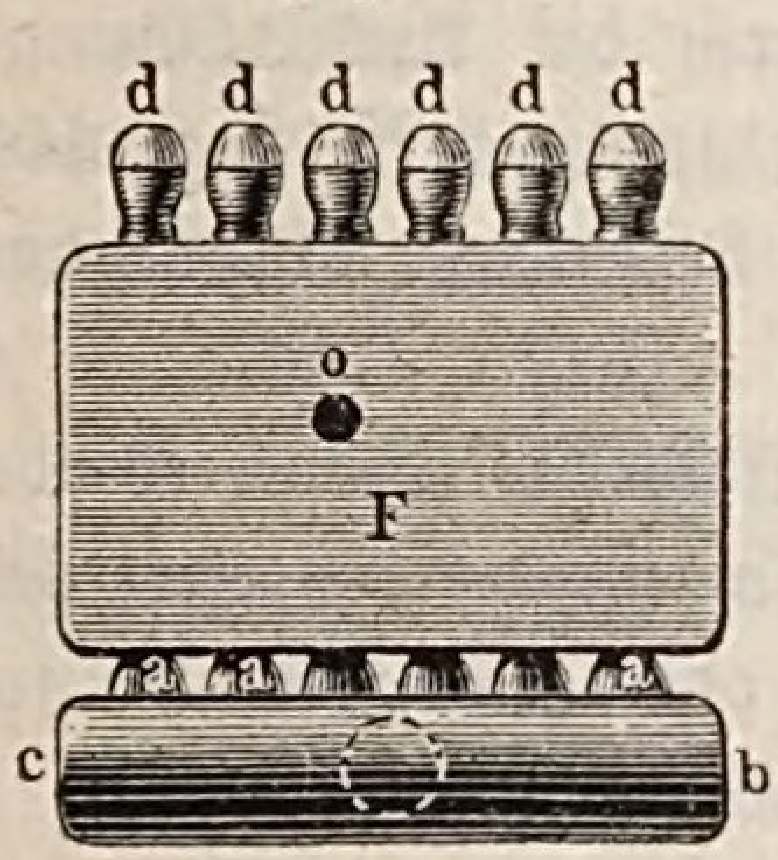
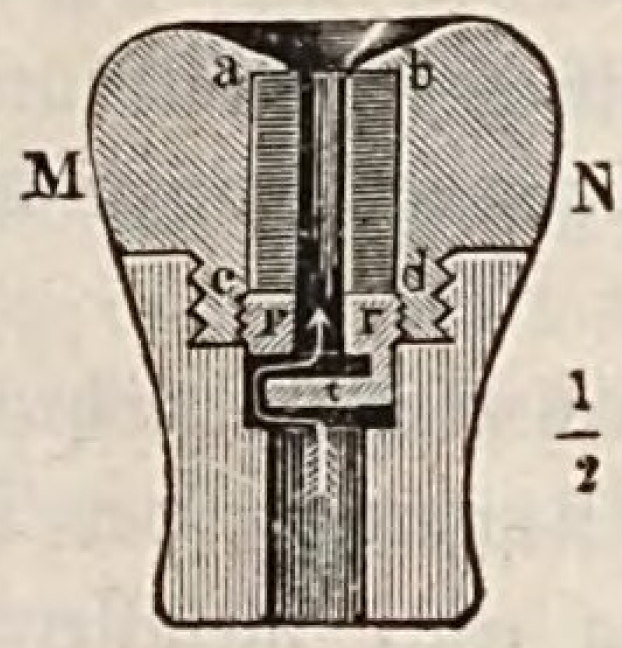


Fig. 408.



der Dampf in das gußeiserne Rohr *bc* und strömt dann durch sechs horizontale Röhren *d d* aus, welche in einem Kasten *F* von Messingblech stecken, der mit kaltem Wasser gefüllt wird, um einen Teil des durch die Röhren strömenden Dampfes zu kondensieren, wodurch die Wirkung sehr verstärkt wird.

Auf eine Öffnung *o* im oberen Deckel des Kastens *F* wird ein Messingrohr aufgesetzt, welches in den Schornstein führt und durch welches die im Kasten *F* gebildeten Dämpfe entweichen.

Fig. 408 stellt eine der Ausströmungsöffnungen im Durchschnitt und zwar in $^1/_2$ der natürlichen Größe dar. An das Ende des Rohres wird ein Messingstück *MN* eingeschraubt, in welchem der das Ende der Ausströmungsröhre bildende und der Länge nach durchbohrte Holzcylinder *abcd* steckt, der durch einen in das Messingstück *MN* eingeschraubten und gleichfalls durchbohrten, kurzen Messingcylinder *r* an seiner Stelle festgehalten wird. Vor der Öffnung dieses Cylinders ist eine Messingplatte so angebracht, daß der Dampf den durch den Pfeil bezeichneten Umweg machen muß, um in die Ausströmungsöffnung zu gelangen.

Wenn der Apparat Fig. 407 auf den Dampfkessel aufgeschraubt ist und der Dampf die nötige Spannkraft hat, wird durch eine Viertelumdrehung des Handgriffes *t*, Fig. 406, der Absperrhahn geöffnet; der Dampf strömt mit Gewalt aus den sechs Öffnungen hervor, und alsbald wird auch der Kessel elektrisch. Der entweichende Dampf hat die entgegengesetzte Elektricität wie der Kessel; um aber die stärkste Wirkung zu erhalten, muß die Elektricität des Dampfes möglichst abgeleitet werden; dies geschieht dadurch, daß man in den Dampfstrom eine Reihe von Metallspitzen stellt, welche, an einem messingenen Konduktor befestigt, mit dem Boden in leitender Verbindung stehen. Dieser Konduktor steht auf einem Glasfuße, so daß man ihn isolieren kann, um zu zeigen, daß der Dampf in der That die entgegengesetzte Elektricität des Kessels hat.

Mit dieser Maschine, die auch Hydroelektrisiermaschine genannt wird, läßt sich eine Batterie (S. 392) von 30 qdm Oberfläche in Zeit von 30 Sekunden vollständig laden.

Die Quelle dieser starken Elektricitätsentwickelung ist nicht etwa, wie man anfangs glaubte, die Dampfbildung selbst, sondern lediglich die Reibung des mit Wasserteilchen vermischten heftig ausströmenden Dampfes an den Wänden der Ausströmungsröhren. Daß dies wirklich der Fall ist, geht daraus hervor,

daß augenblicklich alle Elektricität verschwindet, wenn man das Sicherheitsventil öffnet, während doch die Dampfbildung ununterbrochen fortdauert.

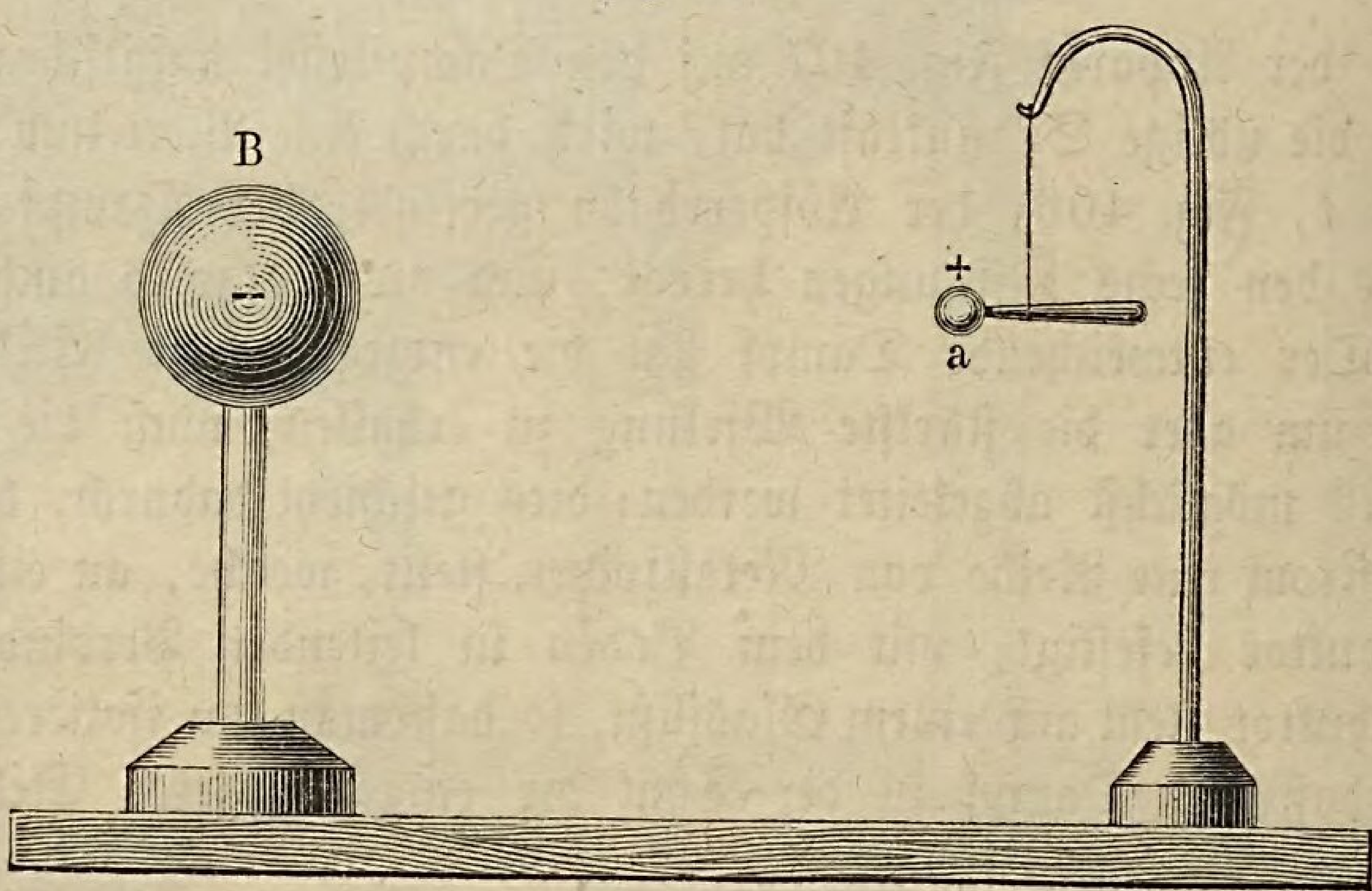
Zur Erzeugung der Elektricität ist es wesentlich, daß schon kondensierte Wasserteilchen von dem ausströmenden Dampf mit durch die Ausströmungsröhren durchgetrieben werden; deshalb der Kondensationsapparat *F*, Fig. 407. Wenn die Ausströmungsröhren lang genug sind, ist kein besonderer Abkühlungsapparat nötig.

Wenn die Dampfmündung durch eine Holzröhre gebildet wird, wie es oben angegeben wurde, so ist der Kessel negativ, der Dampf positiv elektrisch; dasselbe ist der Fall bei Anwendung einer metallenen oder gläsernen Dampfmündung. Wendet man statt der hölzernen eine elfenbeinerne Röhre an, so zeigt der Kessel kaum Spuren einer Ladung.

Wenn man vor der Dampfmündung etwas Terpentinöl in die Ausströmungsröhre bringt, so wird der Kessel positiv und der Dampf negativ elektrisch.

201 **Abnahme der elektrischen Wirkungen mit zunehmender Entfernung.** Das Gesetz, nach welchem die elektrischen Anziehungen und Abstoßungen mit wachsender Entfernung abnehmen, läßt sich auf verschiedene Weise, so z. B. durch die Oscillationen eines elektrischen Pendels, nachweisen. Man läßt ein Schellackstäbchen, das an einem Seidenfaden horizontal aufgehangen ist und an dem einen Ende eine kleine metallene Hohlkugel *a*, Fig. 409, trägt, unter dem Einflusse einer isolierten Kugel *B* schwingen, nachdem

Fig. 409.



man sowohl der Kugel *B* als auch der kleinen Kugel *a* eine elektrische Ladung mitgeteilt hat. Sind *a* und *B* mit entgegengesetzten Elektricitäten geladen, so nimmt das Schellackstäbchen mit der Kugel *a* die in Fig. 409 angedeutete Stellung ein, sind aber *a* und *B* mit derselben Elektricität geladen, so wird das Schellackstäbchen eine solche Stellung einnehmen, daß *a* das von *B* abgewendete Ende desselben bildet. Entfernt man das kleine Pendel etwas aus seiner Gleichgewichtslage in horizontaler Ebene, so schwingt es um seine verti-

kale Axe; aus der Schwingungsdauer kann man dann auf die Intensität der Wirkung schließen, welche die Elektricität, mit welcher B geladen ist, auf diejenige ausübt, welche a enthält.

Bezeichnen wir nun mit t die Schwingungsdauer des kleinen elektrischen Pendels für eine bestimmte Entfernung der beiden Kugeln, so wird man bei gleichen Ladungen die Schwingungsdauer nahe gleich $2t$, $3t, \ldots nt$ finden, wenn der Abstand der beiden Kugeln 2mal, 3mal ... $n$mal so groß ist.

Nun aber ist die Schwingungsdauer irgend eines Pendels stets der Quadratwurzel aus der treibenden Kraft umgekehrt proportional, wir haben also:

$$t : nt = \sqrt{\frac{1}{v}} : \sqrt{\frac{1}{v'}},$$

wenn wir mit v die treibende Kraft bezeichnen, welche auf das kleine Pendel bei einfachem, und mit v' diejenige, welche auf dasselbe bei dem $n$fachen Abstand der Kugeln a und B wirkt. Aus obiger Gleichung ergiebt sich aber

$$v' = \frac{v}{n^2}.$$

Die Intensität der elektrischen Wirkung zwischen den beiden Kugeln a und B nimmt also in demselben Verhältnis ab, in welchem das Quadrat ihrer Entfernung wächst, oder wie man gewöhnlich kurz ausdrückt: sie verhält sich umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung.

Verbreitung der Elektricität auf der Oberfläche leitender Körper. 202 So lange ein Körper im natürlichen Zustande sich befindet, d. h. so lange die beiden elektrischen Fluida noch verbunden sind, sind sie wahrscheinlich ganz gleichförmig in der ganzen Masse des Körpers verteilt. Sobald aber ein Leiter mit freier Elektricität geladen ist, wirken die einzelnen Teilchen dieser freien Elektricität abstoßend auf einander und entfernen sich deshalb so weit von einander, als nur irgend möglich ist, bis sie durch irgend ein Hindernis aufgehalten werden. Ein vollkommen leitender Körper kann in seinem Innern dieser Abstoßung kein Hindernis entgegensetzen; die Elektricität wird sich deshalb über seine Oberfläche verbreiten und sich noch weiter zerstreuen, wenn sich der Körper in einem für die Elektricität leicht durchdringlichen Raum befindet. Ist aber der leitende Körper von Nichtleitern, wie z. B. Luft, umgeben, so wird die Elektricität von diesen zurückgehalten und kann sich somit nur über die Oberfläche des Leiters verbreiten.

Um zu zeigen, daß sich die freie Elektricität nur über die Oberfläche der Leiter verbreitet, hat man mehrere Apparate konstruiert, von welchen der in Fig. 410 (a. f. S.) dargestellte sich durch seine Einfachheit sehr empfiehlt. Zwei Blechringe von 20 bis 25 cm Durchmesser sind durch vier vertikale Blechstreifen a, b, c und d und durch 24 vertikale Drähte mit einander verbunden, welche bis auf zwei auf der linken Seite der Figur sichtbare in der Zeichnung

weggelassen wurden, damit man in das Innere des Apparates hinein sehen kann. An jeden der Blechstreifen ist mit seinem oberen Ende innen und außen ein Papierstreifen angeklebt, und ebenso hängen in der Mitte des Apparates

Fig. 410.

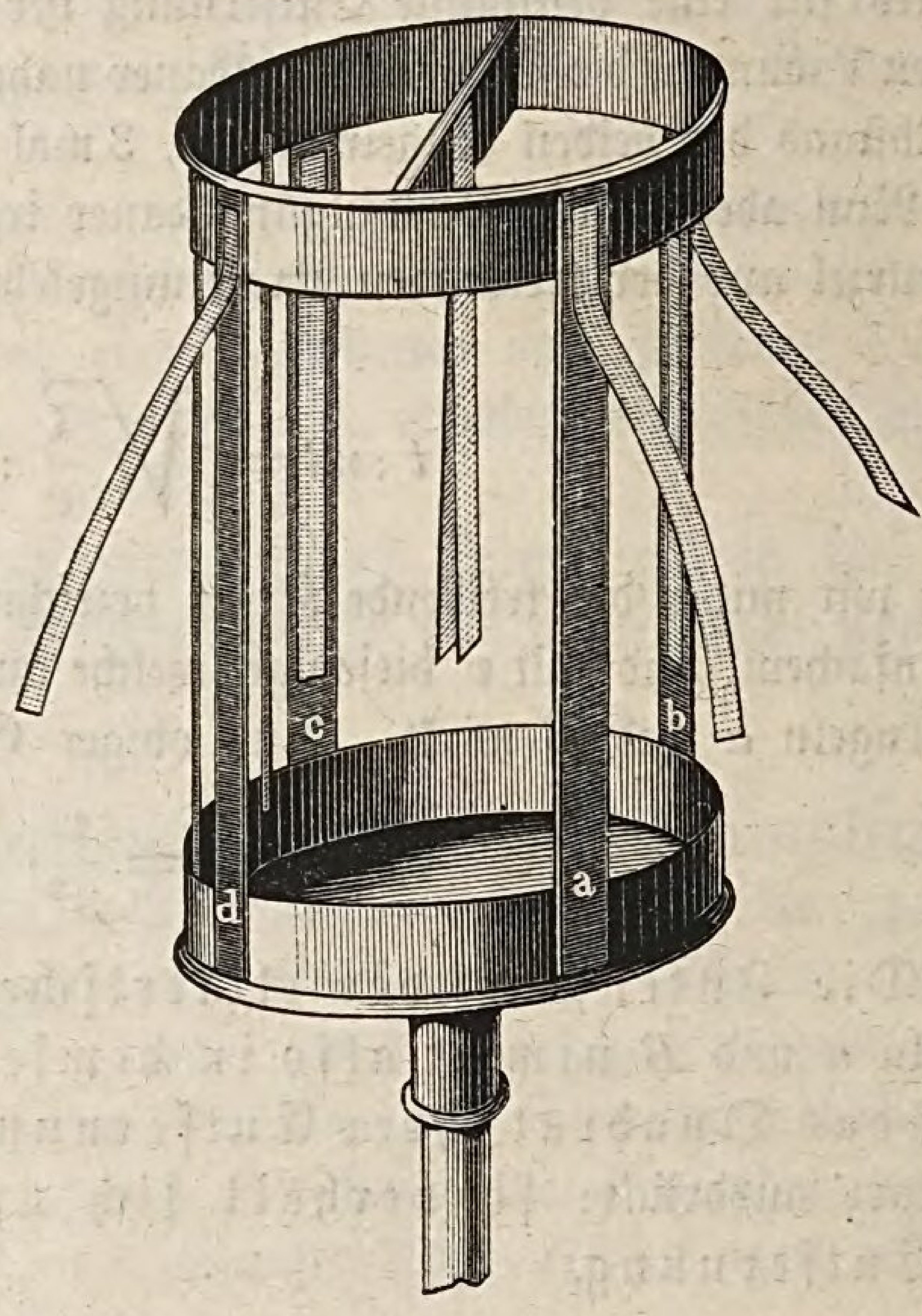
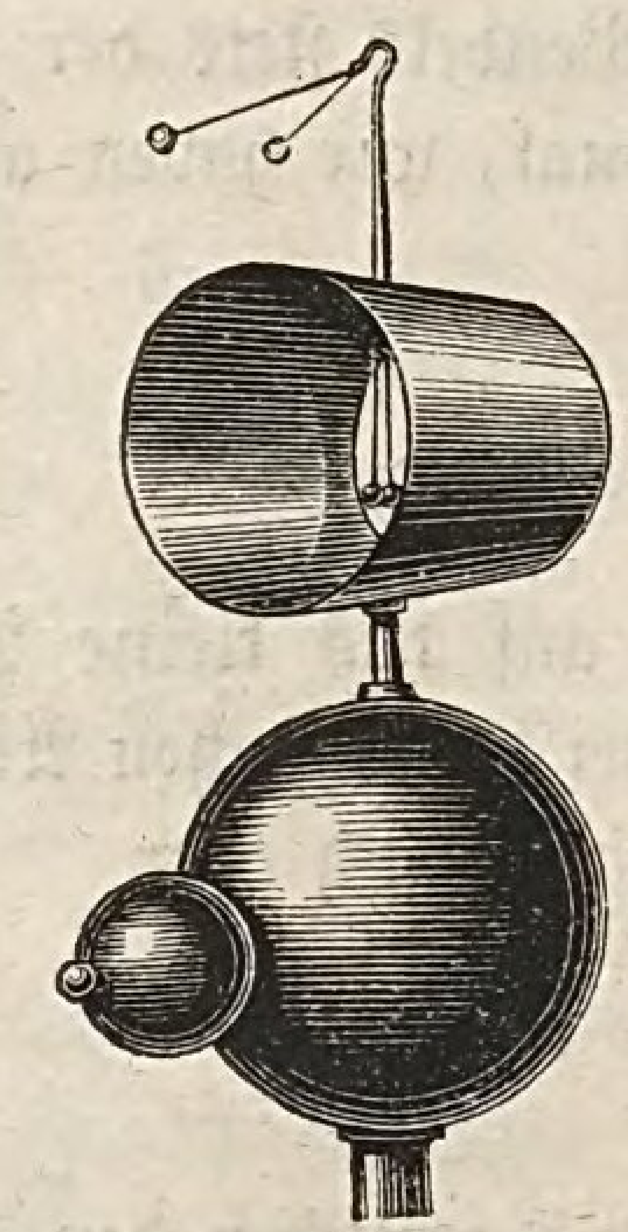


Fig. 411.



zwei Papierstreifen dicht neben einander herab, welche von einem diametral eingesetzten horizontalen Blechstreifen getragen werden. Wird dieser Apparat mittels eines Holzzapfens auf den Konduktor der Elektrisiermaschine aufgesetzt, so werden die äußeren Papierstreifen abgestoßen, sobald die Maschine gedreht wird, während die im Innern befindlichen keine Spur einer elektrischen Abstoßung zeigen.

Fig. 411 zeigt einen ebenso einfachen, zu dem gleichen Zweck konstruierten Apparat, welcher keiner Erläuterung bedarf.

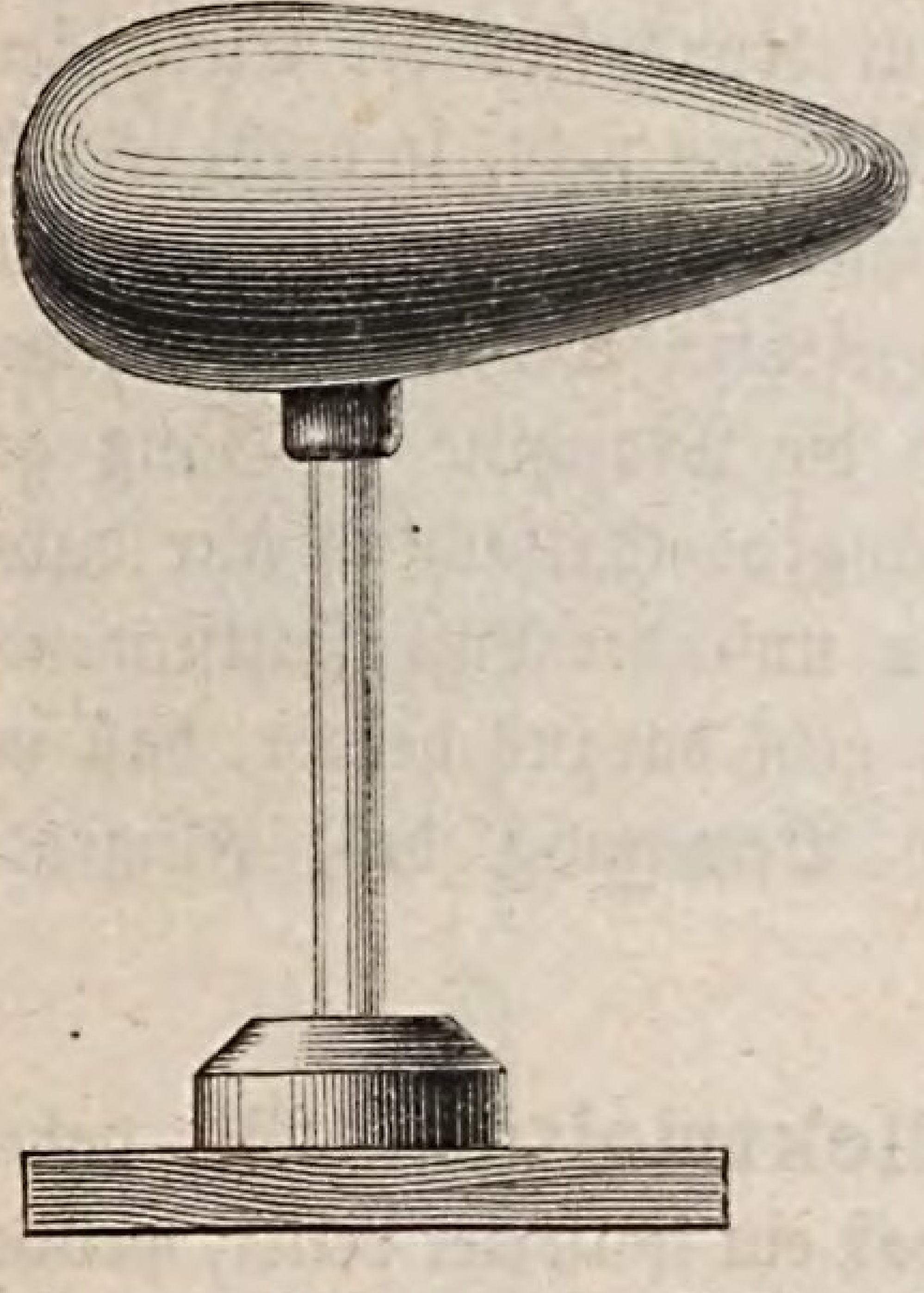
Es fragt sich nun, in welcher Weise sich die Elektricität auf der Oberfläche der Körper verbreitet.

Elektrisiert man eine isolierte Kugel, so erfordert schon das Gesetz der Symmetrie, daß sich die Elektricität auf der ganzen Oberfläche gleichförmig verbreitet, daß sie eine Schicht bildet, welche überall gleiche Dichtigkeit hat.

Wenn aber der isolierte Leiter, den man elektrisiert, nicht kugelförmig ist, so findet auch keine gleichmäßige Verbreitung der Elektricität statt, d. h. die elektrische Schicht, welche sich über den Körper verbreitet, hat nicht überall gleiche Dichtigkeit. Untersucht man die Dichtigkeit der Elektricität an verschiedenen Stellen eines eiförmigen, isolierten Leiters, Fig. 412, so ergiebt sich, daß sie am spitzen Ende bei *a* am größten, an den Stellen der schwächsten Krümmung wie bei *b*, aber am kleinsten ist.

Daß eine solche Verbreitung der Elektricität auf der Oberfläche von Körpern stattfinden müsse, welche nach verschiedenen Richtungen hin ungleiche Ausdehnung haben, läßt sich leicht einsehen; denn infolge der gegenseitigen Abstoßung der einzelnen Teilchen des elektrischen Fluidums werden sie sich möglichst weit von der Mitte des Körpers entfernen, also vorzugsweise in den entferntesten Hervorragungen anhäufen.

Fig. 412.



Je mehr sich die Gestalt eines Körpers von der Kugelgestalt entfernt, desto ungleichförmiger verbreitet sich die Elektricität auf seiner Oberfläche, sie häuft sich an den von seiner Mitte entfernteren Enden am meisten an, und zwar um so mehr, je dünner sie sind. Es geht daraus hervor, daß, wenn man an einem isolierten Leiter eine leitende Spitze anbringt, die Elektricität an dieser Spitze eine außerordentliche Dichtigkeit haben muß. Je dichter aber die Elektricität in einem Punkte ist, desto eher wird sie durch die Luft entweichen. Daher kommt es, daß aus Spitzen die Elektricität so leicht ausströmt. Dieses Ausströmen der Elektricität läßt sich durch folgende Versuche erläutern.

1. Versieht man den Konduktor einer Elektrisiermaschine mit einer Metallspitze, so ist es unmöglich, ihn so zu laden, daß man aus ihm Funken ziehen könnte, namentlich, wenn man der Spitze einen nicht isolierten Leiter entgegenhält.

Nähert man eine solche Spitze, die mit dem Boden in leitender Verbindung steht, dem Konduktor der Maschine so ist es gleichfalls unmöglich, ihn zu laden. Die Elektricität des Konduktors zerlegt die verbundenen Elektricitäten der Spitze, sie stößt die gleichnamige ab und zieht die ungleichnamige an; diese ungleichnamige Elektricität häuft sich in der Spitze so stark an, daß sie nach dem Konduktor überströmt, um seine Elektricität zu neutralisieren.

Auf die erwähnte Eigenschaft metallener Spitzen gründet sich auch die Konstruktion der Blitzableiter.

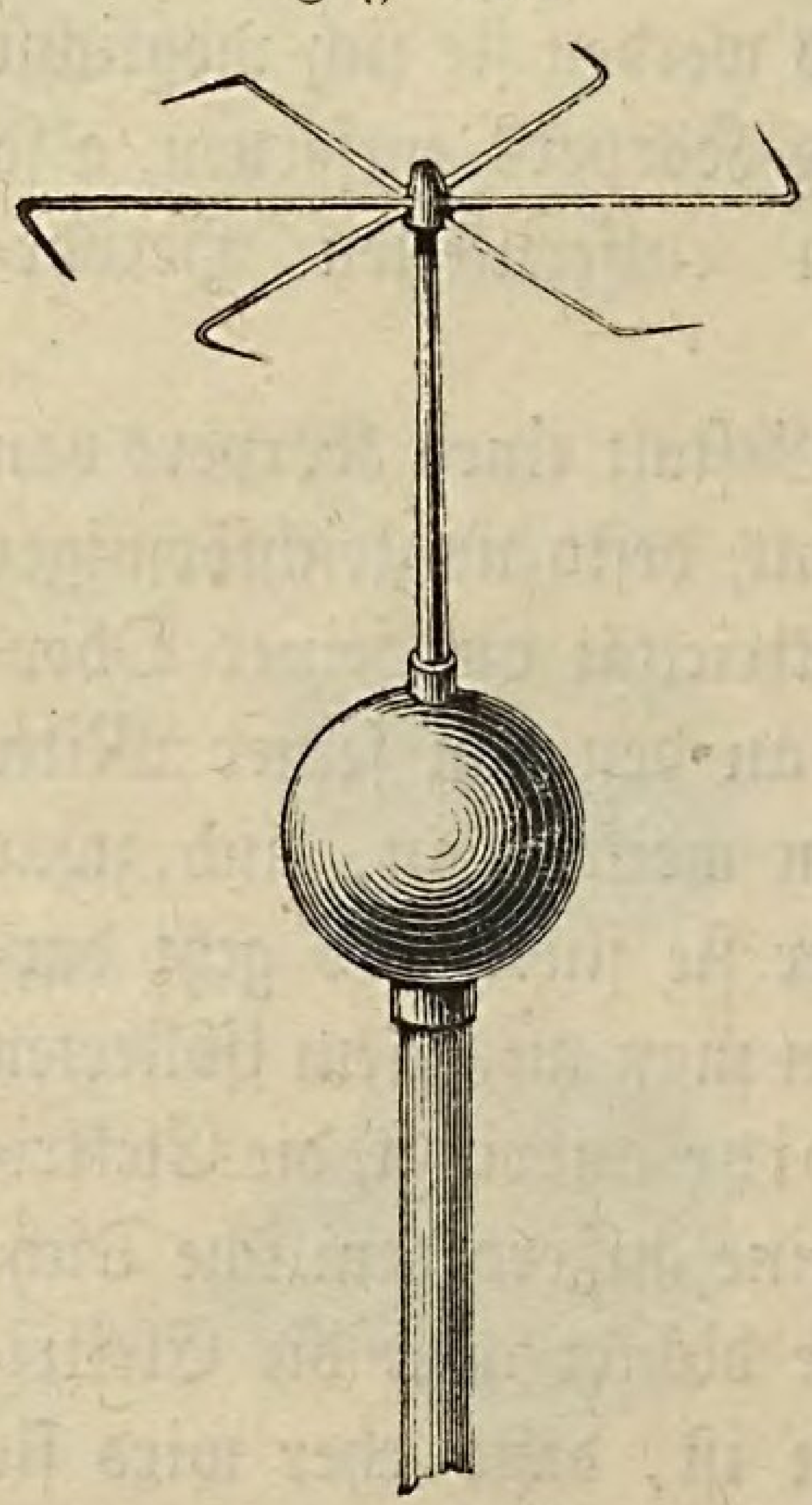
Winkel und scharfe Kanten, die sich an leitenden Körpern befinden, wirken ganz auf dieselbe Weise wie die Spitzen. Man muß deshalb sorgfältig alle eckigen Formen vermeiden, wenn man Apparate konstruieren will, welche bestimmt sind, eine elektrische Ladung aufzunehmen und zu halten.

Wenn man einer Metallspitze, welche auf den Konduktor der Elektrisiermaschine aufgesetzt ist, die Hand nähert, so fühlt man einen von der Spitze ausgehenden Wind, so lange die Maschine gedreht wird. Dieser elektrische Wind rührt daher, daß die mit der Spitze in Berührung kommenden Luftteilchen eine elektrische Ladung annehmen und dann von der Elektricität der Spitze abgestoßen werden.

Die Abstoßung zwischen Spitze und Luft ist gegenseitig; wird daher die Spitze beweglich gemacht, so wird sie selbst in Bewegung versetzt, und zwar

in der dem elektrischen Winde entgegengesetzten Richtung. Hierauf beruht das elektrische Flugrad (Fig. 413). Dasselbe besteht aus zwei oder mehreren Armen von Metall, welche mit dem einen Ende an einem Hütchen befestigt, am anderen Ende aber zugespitzt und im gleichen Drehungssinn umgebogen sind. Setzt man dieses Rädchen mit seinem Hütchen auf eine metallene Spitze, die mit dem Konduktor der Elektrisiermaschine in leitender Verbindung steht, so dreht es sich, wie das Segner'sche Wasserrad, mit großer Geschwindigkeit in dem entgegengesetzten Sinne der Richtung der Spitzen um, sobald die Maschine in Gang gesetzt wird. Daß das Flugrad thatsächlich nur durch die zwischen den Spitzen und der Luft stattfindende Abstoßung bewegt wird, geht daraus hervor, daß im luftleeren Raume keine Bewegung des Flugrads eintritt.

Fig. 413



203 **Gebundene Elektricität.** Wir haben schon (§. 195) gesehen, daß ein isolierter Leiter, welcher in der Nähe eines elektrischen Körpers steht, durch Verteilung elektrisch wird und daß er, mit dem Boden in leitende Verbindung gesetzt, doch mit derjenigen Elektricität geladen bleibt, welche der des verteilenden Körpers entgegengesetzt ist. Wenn zwei isolierte Leiter sich nahe bei einander befinden, von welchen der eine mit positiver, der andere mit negativer Elektricität geladen ist, so wird jeder derselben einen Teil der Elektricität auf den anderen zurückzuhalten oder zu binden im Stande sein. Je näher die beiden Elektricitäten einander gebracht werden, desto stärker ziehen sie sich an, desto vollständiger ist also auch ihre gegenseitige Bindung. Sind aber die beiden Leiter nur durch eine Luftschicht getrennt, so kann man sie einander nicht sehr nähern, ohne daß die Luftschicht durchbrochen wird und ein Funken überspringt. Wenn also die Bindung möglichst vollkommen sein soll, so dürfen die beiden mit entgegengesetzten Elektricitäten geladenen Leiter nicht durch Luft, sondern müssen durch einen anderen Isolator getrennt sein, welcher dem Übergange der Elektricität einen größeren Widerstand entgegensetzt; man wählt dazu am besten Glas oder Harz.

Um die Erscheinungen der gebundenen Elektricität näher zu untersuchen, kann man die Franklin'sche Tafel benutzen, welche in Fig. 414 von vorn und in Fig. 415 von der Seite gesehen dargestellt ist. Sie besteht aus einer ungefähr 9 qdm großen Glasscheibe, deren Mitte auf jeder Seite mit Stanniol belegt ist, so daß das Glas an dem Rande ungefähr handbreit frei bleibt. An jeder Belegung ist ein an einem leinenen Faden hängendes Korkkügelchen angebracht, wie es die Figuren zeigen.

Wenn man nun die vordere Belegung mit positiver, die hintere mit negativer Elektricität ladet, so sind die beiden entgegengesetzten Elektricitäten nur durch die Dicke der Glasscheibe von einander getrennt; die gegenseitige Bindung

kann also ziemlich vollständig sein. **Diese Bindung** macht es aber auch möglich, auf den Belegungen der **Franklin'schen** Tafel weit größere Elektricitätsmengen anzuhäufen, als sonst möglich gewesen wäre, wie sich aus folgender Betrachtung ergiebt.

Fig. 414.

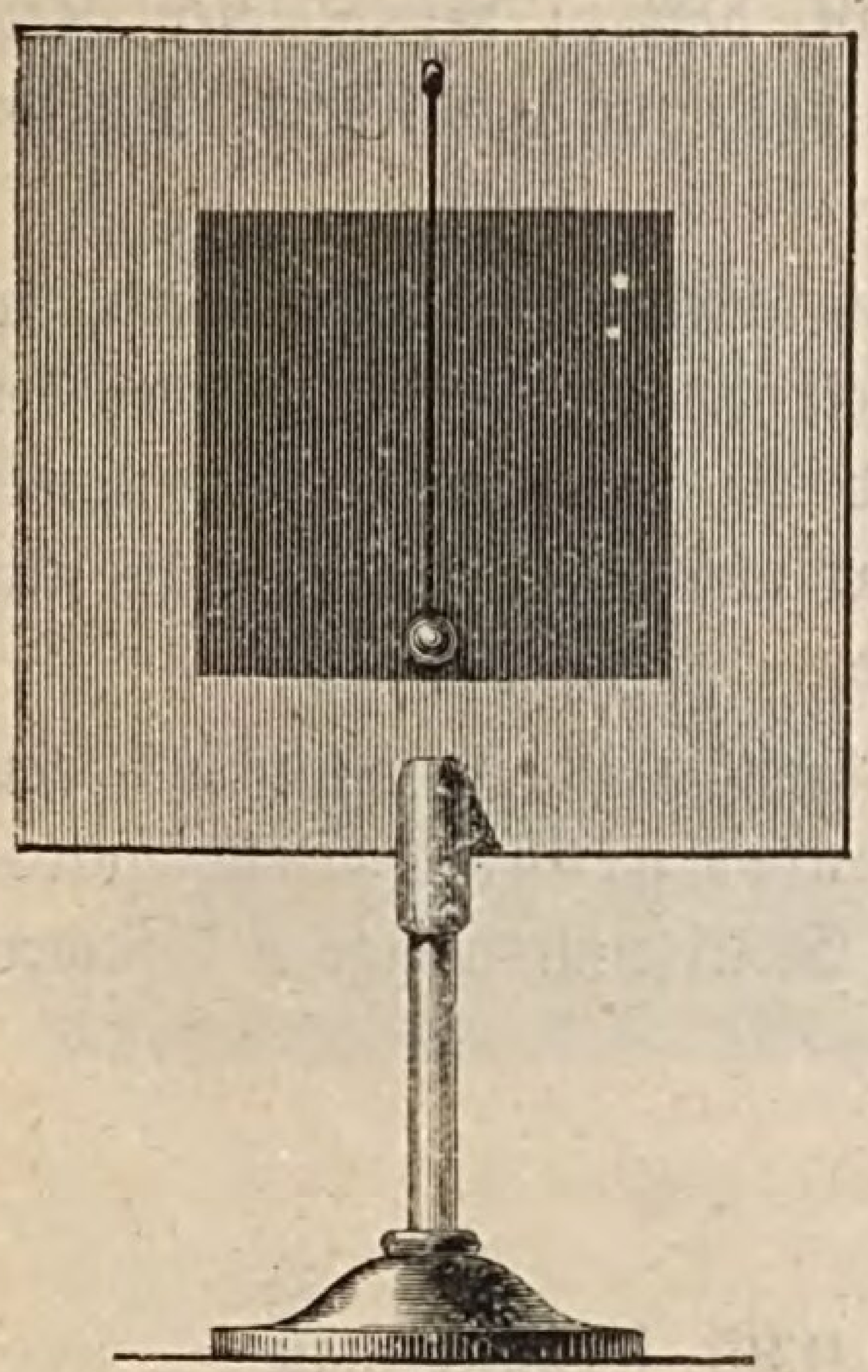
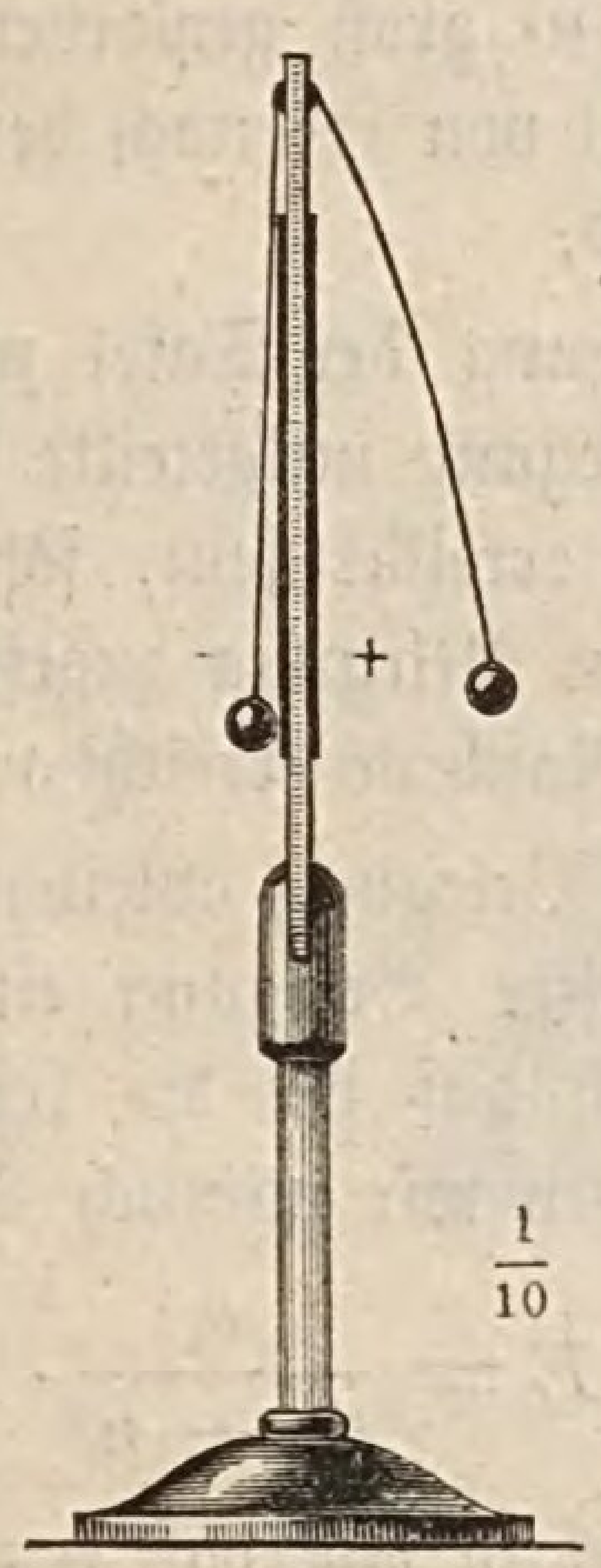


Fig. 415.



$\frac{1}{10}$

Es sei die vordere Belegung der **Franklin'schen** Tafel in Fig. 414 oder die Belegung auf der rechten Seite in Fig. 415 mit einer bestimmten Menge positiver Elektricität geladen, die wir mit $+ E$ bezeichnen wollen, so wird sich die hintere Belegung, wenn sie ableitend berührt ist, mit einer gewissen Menge **gebundener negativer** Elektricität laden, die wir mit e bezeichnen wollen.

Diese Menge e wird um so größer sein, je größer die Menge E ist, und kann daher gleich nE gesetzt werden, wenn n einen echten Bruch bezeichnet, welcher sich der Einheit um so mehr nähert, je dünner die Glasplatte ist.

Die gebundene negative Elektricität der hinteren Belegung wirkt aber selbst wieder bindend zurück auf die positive der vorderen, und zwar ist die Quantität, welche sie zu binden vermag, gleich ne oder gleich n^2E; es bleibt also auf der vorderen Belegung die Elektricitätsmenge

$$a = E - n^2 E = E(1 - n^2) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

als **freie** Elektricität übrig.

Damit also auf der einen Belegung der **Franklin'schen** Tafel eine bestimmte Quantität Elektricität vollständig gebunden sei, muß sich auf der anderen Belegung ein entsprechender **Überschuß entgegengesetzter Elektricität** im **freien Zustande** befinden.

Während demnach das elektrische Pendel auf derjenigen Seite der geladenen **Franklin'schen** Tafel frei vertikal herabhängt, auf welcher alle Elektricität gebunden ist, wird das Pendel auf der anderen Seite, auf welcher sich ein Überschuß freier Elektricität befindet, abgestoßen, wie Fig. 415 zeigt.

Wenn man diejenige Belegung, auf welcher sich ein Überschuß freier Elektricität befindet, ableitend berührt, während die andere isoliert bleibt, so fällt an der ersteren das Pendel herab, während es an der letzteren steigt. So kann man abwechselnd auf der einen und dann wieder auf der anderen Seite der **Franklin'schen** Tafel, den Überschuß freier Elektricität wegnehmen, und so die Tafel nach und nach entladen.

Die Franklin'sche Tafel wird dadurch geladen, daß man die eine Belegung derselben mit dem Konduktor der gedrehten Elektrisiermaschine, die andere mit dem Boden in leitende Verbindung setzt.

Die Grenze der Ladung der mit dem Konduktor der Maschine verbundenen Belegung ist erreicht, wenn die Dichtigkeit der auf ihr vorhandenen freien Elektricitätsmenge a so groß geworden ist, daß in der gleichen Zeit gerade eben so viel Elektricität von ihr nach der Umgebung ausströmt, als ihr vom Konduktor zugeführt wird.

Wenn die hintere Belegung der Tafel nicht ableitend berührt wird, so bleibt alle der vorderen Belegung mitgeteilte Elektricität frei; die Grenze der Ladung wird in diesem Fall erreicht sein, sobald die oben mit a bezeichnete Elektricitätsmenge der vorderen Belegung zugeführt worden ist, was schon mit 1 oder 2 Umdrehungen der Maschine erreicht wird.

Wenn aber die hintere Belegung ableitend berührt ist, so muß nach den obigen Betrachtungen die vordere Belegung eine viel größere Elektricitätsmenge E enthalten, wenn sich auf ihr die freie Elektricitätsmenge a befinden soll. Nach Gleichung 1) haben wir nämlich

$$E = \frac{a}{1 - n^2}.$$

Wäre z. B. die Glastafel so dick, daß $n = 0{,}95$, so hätte man

$$E = 10\ a.$$

Für den Fall also, daß die hintere Belegung ableitend berührt ist, kann auf der Franklin'schen Tafel eine Elektricitätsmenge angehäuft werden, welche 10 mal so groß ist, als sie sein würde, wenn die hintere Belegung isoliert bliebe oder gar nicht vorhanden wäre.

In der That bedarf es eines längeren Drehens der Maschine, bis das Pendel an der vorderen Belegung durch sein Aufsteigen die Grenze der Ladung anzeigt, wenn die hintere Belegung ableitend berührt ist, als wenn sie isoliert bleibt. Noch besser läßt sich aber dies mit Hülfe der sogleich zu besprechenden Leydner Flasche zeigen.

204 **Die Leydner Flasche** ist nur eine veränderte Form der Franklin'schen Tafel und besteht aus einem Glasgefäße, welches außen mit einer aufgeklebten Belegung von Stanniol versehen ist, die bis auf einige Zoll vom Rande hinaufreicht, innen dagegen entweder auf ähnliche Weise mit einer Belegung versehen ist, oder mit einer leitenden Substanz, etwa Eisenfeile, oder Schrotkörnern, gefüllt ist. Die innere Belegung ist mit einem Messingstabe leitend verbunden, welcher durch den Stopfen oder den Deckel des Gefäßes hindurchgeht und in einem Knopfe endigt. Fig. 416 und Fig. 417 stellen zwei häufig angewendete Formen der Leydner Flasche dar. Der besseren Isolierung wegen empfiehlt es sich, den nicht belegten Teil der Flasche, mit einem Firnis zu überziehen. Um die Flasche zu laden, bringt man die äußere

Belegung mit dem Boden, den Knopf mit dem Konduktor der Maschine in leitende Verbindung.

Daß infolge der Ableitung der äußeren Belegung eine weit größere

Fig. 416.

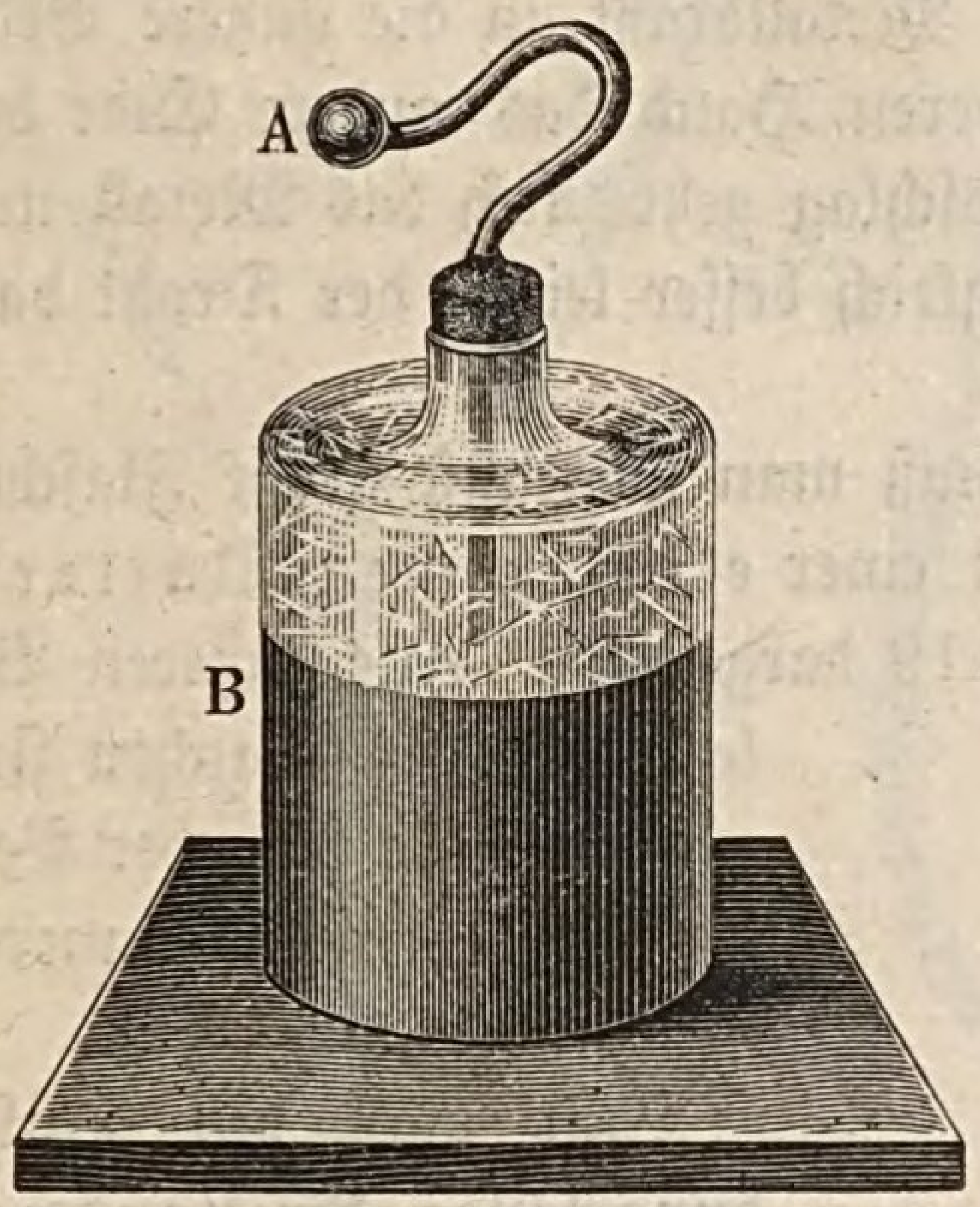


Fig. 417.

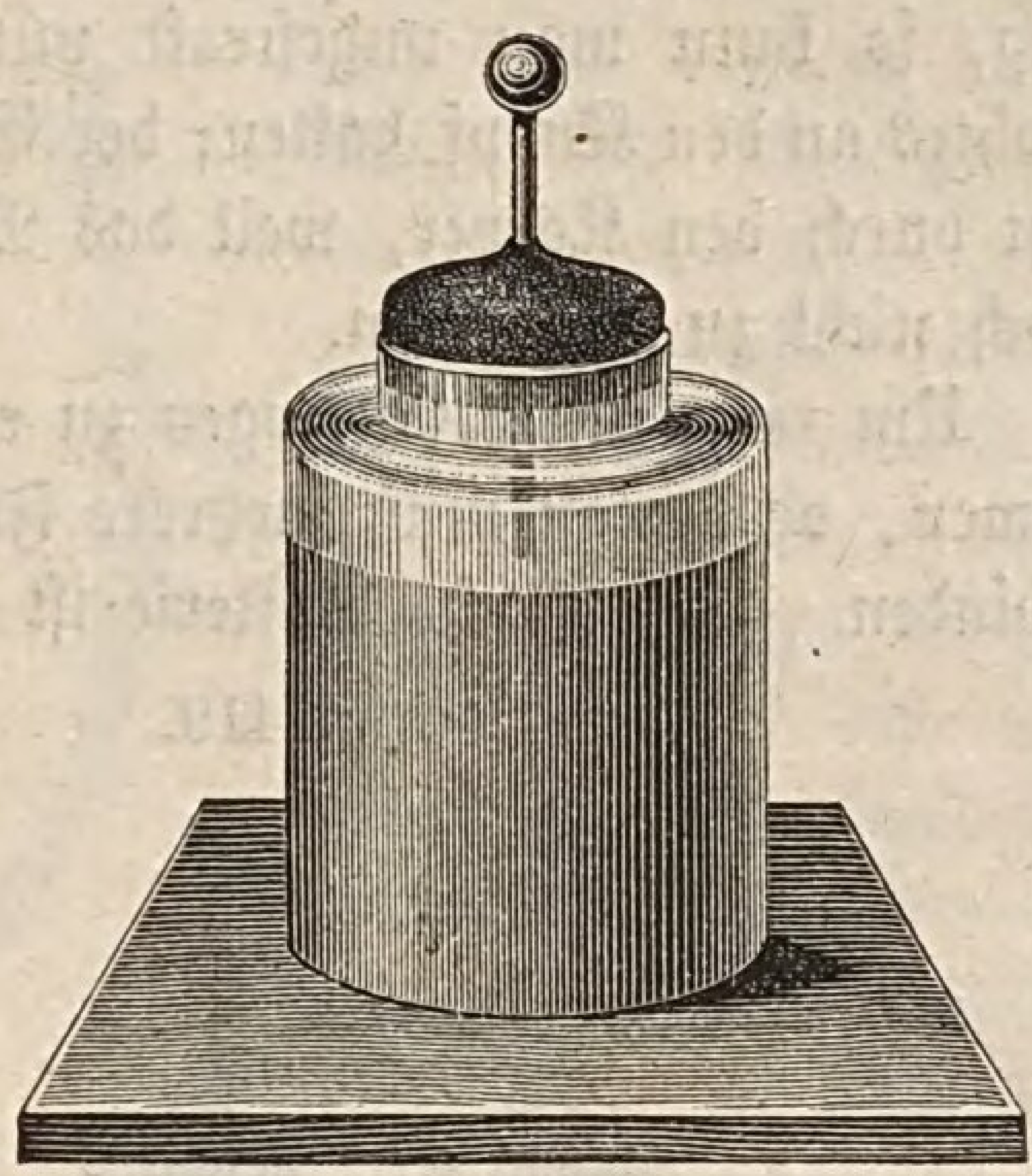
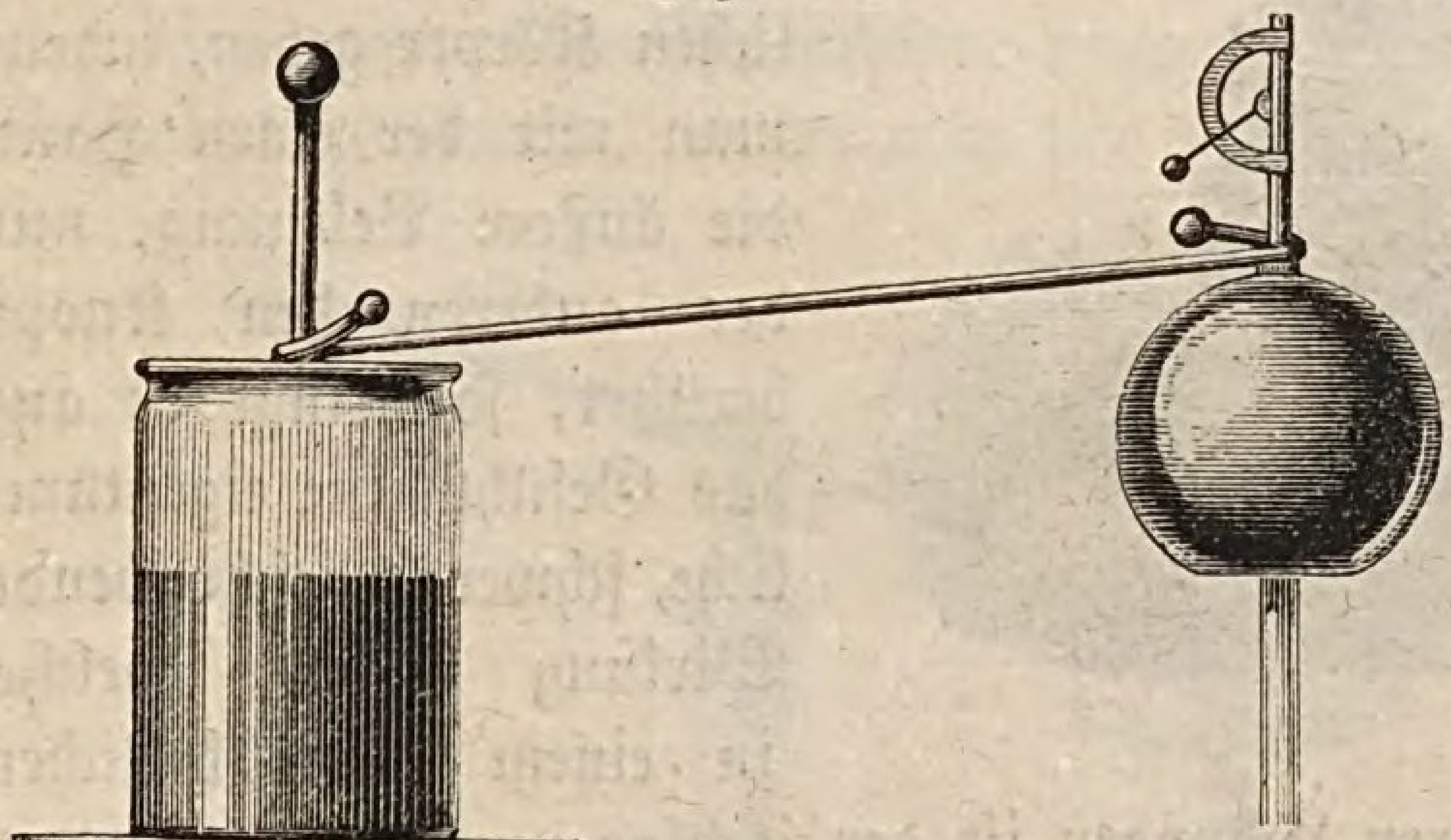


Fig. 418.



Elektricitätsmenge auf der inneren angehäuft werden kann als ohne dies möglich wäre, wie am Schlusse des vorigen Paragraphen bebehauptet worden ist, läßt sich am besten in folgender Weise zeigen. Man setze eine Leydner Flasche auf einen gut isolierenden Harzkuchen und bringe die innere Belegung derselben mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine in Verbindung, auf welchem, wie Fig. 418 zeigt, ein Quadrantenelektrometer aufgesetzt ist; alsdann wird schon nach einer Umdrehung der Scheibe das Elektrometer einen Ausschlag von 20 bis 30 Grad zeigen. Sobald dagegen die äußere Belegung mit dem Boden in leitende Verbindung gesetzt wird, fällt das Elektrometer zusammen, weil fast alle Elektricität, welche vorher im freien Zustande auf der inneren Belegung vorhanden war, nun gebunden wird, und so von neuem Elektricität vom Konduktor nach der Belegung überströmen kann. Es sind jetzt 8 bis 10 Umdrehungen der Maschine nötig, ehe das Elektrometer wieder seinen alten Ausschlag erreicht hat, ein Beweis, daß bei ableitend berührter äußerer Belegung die Flasche eine 8 bis 12 mal größere Elektricitätsmenge aufzunehmen im Stande ist als bei isolierter.

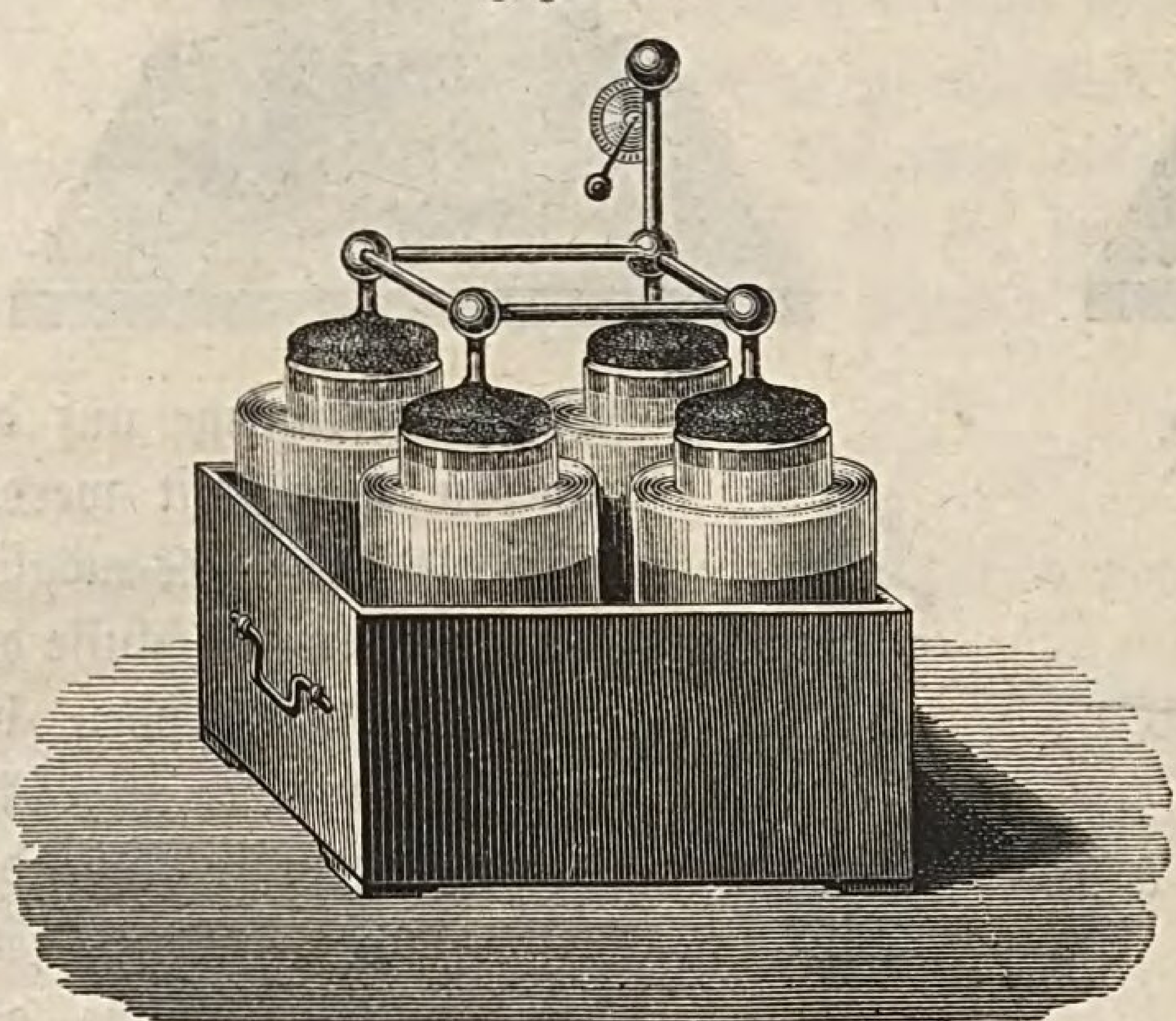
Die Leydner Flaschen entladen sich manchmal von selbst, indem entweder ein Funken von der äußeren Belegung zu dem Metallstabe überspringt, oder

indem das Glas durchbrochen wird. Im letzteren Falle ist die Flasche natürlich für die Folge unbrauchbar.

Wenn man zur Entladung der Flasche mehrere Leiter zugleich anwendet, so teilt sich der Entladungsschlag im Verhältnisse ihrer Leitungsfähigkeit. Drückt man z. B. mit der einen Hand einen Metalldraht an die äußere Belegung, so kann man ungestraft mit der anderen Hand das andere Ende des Drahtes an den Knopf halten; der Entladungsschlag geht durch das Metall und nicht durch den Körper, weil das Metall ungleich besser leitet; der Draht darf jedoch nicht zu dünn sein.

Um recht starke Ladungen zu erhalten, muß man möglichst große Flaschen nehmen, oder man muß mehrere Flaschen zu einer elektrischen Batterie verbinden. Eine solche Batterie ist in Fig. 419 dargestellt. Alle äußeren Belegungen der Flaschen sind unter sich in leitender Verbindung, ebenso alle inneren Belegungen.

Fig. 419.



Läßt man den Entladungsschlag der Leydner Flasche durch den menschlichen Körper gehen, indem man mit der einen Hand die äußere Belegung, mit der anderen den Knopf berührt, so bringt er auf das Gefühl eine eigentümliche, schwer zu beschreibende Wirkung hervor, welche in einem unwillkürlichen Zucken besteht. Bei schwächeren Ladungen ist der Schlag nur in den Vorderarmen, bei stärkeren ist er auch in den Oberarmen fühlbar, stark geladene größere Flaschen oder Batterieen können sogar heftige Schmerzen in der Brust hervorbringen und überhaupt gefährlich werden. Für kleinere Tiere sind solche starke Entladungsschläge tödlich.

Wenn mehrere Personen eine Kette bilden, indem sie einander die Hände reichen, und die erste die äußere Belegung der Flasche, die letzte den Knopf anfaßt, so fühlen alle den Schlag auf einmal.

Brennbare Flüssigkeiten, wie Schwefeläther oder erwärmter Weingeist, kann man mit Hülfe der Leydner Flasche weit sicherer anzünden als mit dem direkten Funken vom Konduktor der Maschine. Schießbaumwolle und Schießpulver, selbst gepulvertes Kolophonium, welches man auf Baumwolle streut, kann man gleichfalls mit dem Entladungsfunken der Leydner Flasche entzünden.

Um eine Flasche oder eine Batterie bequem entladen zu können, wendet man den Auslader, Fig. 420, an. Zwei Messingkugeln *a* und *b* sind am Ende zweier Messingarme befestigt, die bei *c* durch ein Scharnier verbunden sind.

Das Scharnier sitzt auf einer Messinghülse, welche auf den isolierenden Glasstab *m* aufgekittet ist. Der Experimentator nimmt diesen Glasstab in die Hand, bringt die eine Kugel in leitende Verbindung mit der äußeren Belegung und nähert dann rasch die andere Kugel dem Knopfe der inneren Belegung.

Fig. 420.

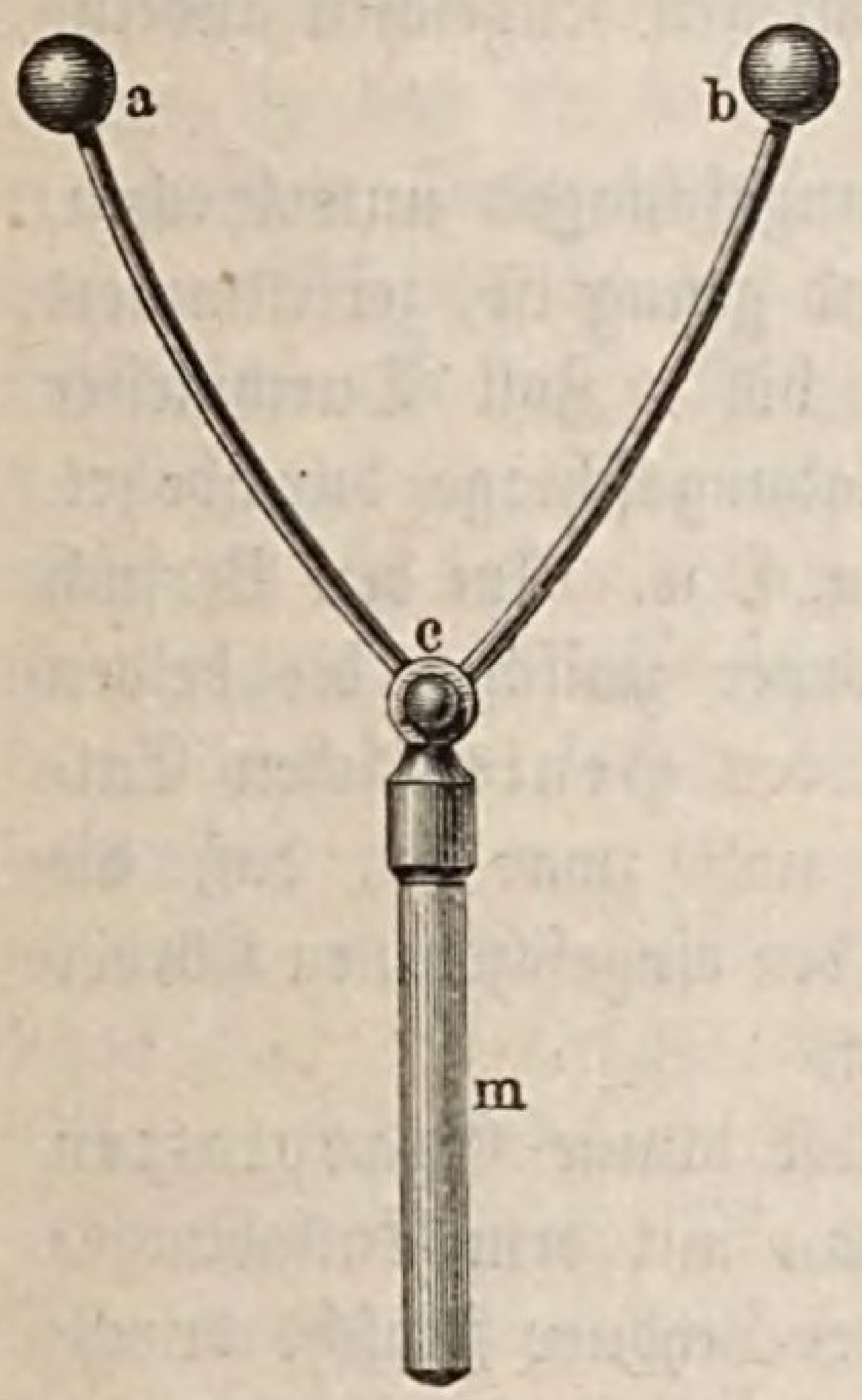


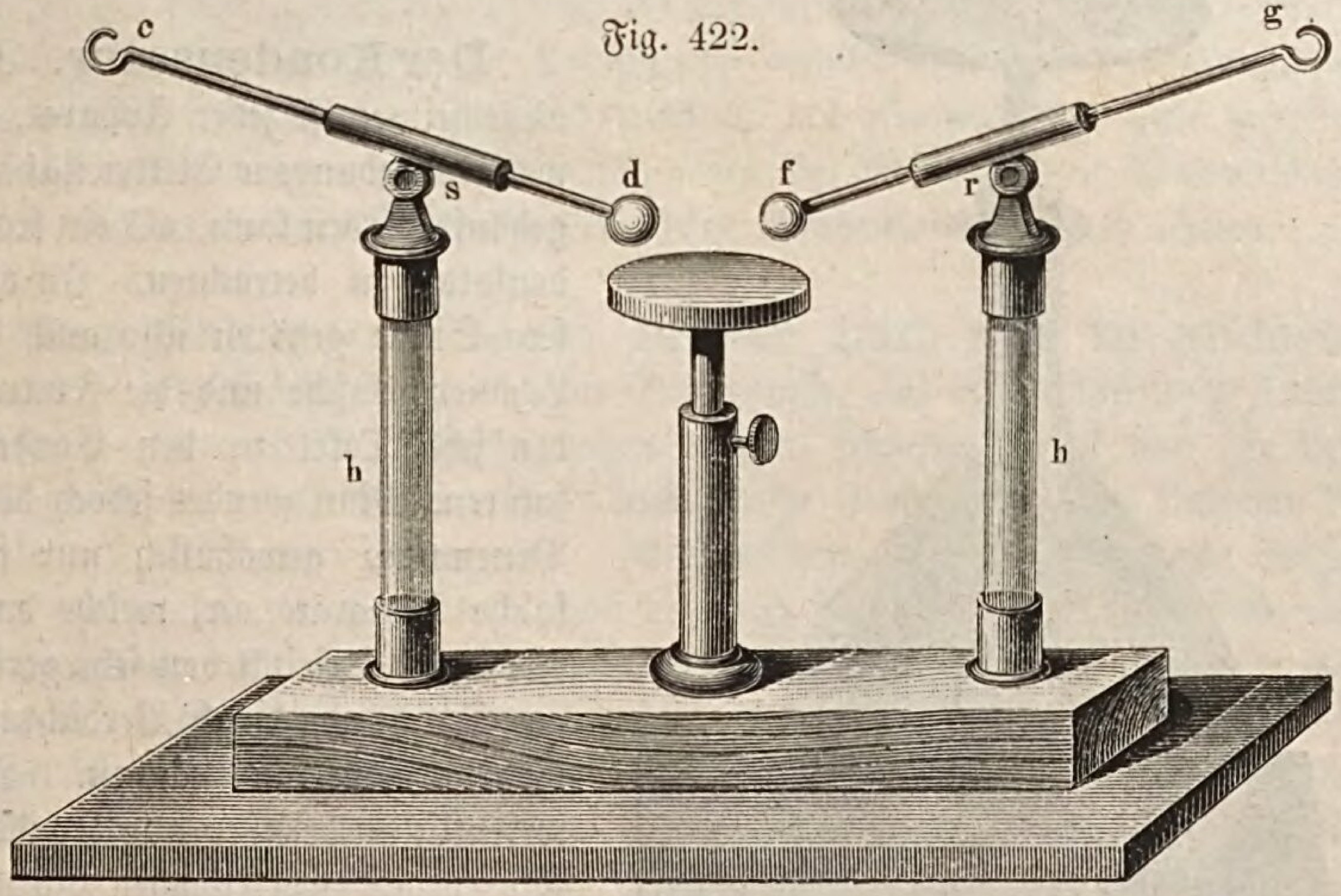
Fig. 421.



Den bequemsten und einfachsten Auslader bildet ein gegen 2 mm dicker, etwas über 1 m langer Kupferdraht, welcher mit einer Röhre von Kautschuk oder Guttapercha umgeben ist, und dessen Enden, wie Fig. 421 zeigt, mit Messingkugeln von ungefähr $1\frac{1}{2}$ cm Durchmesser versehen sind.

Um verschiedene Gegenstände bequem in den Weg des Entladungsschlages einschalten zu können, wendet man den Henley'schen Auslader, Fig. 422, an.

Fig. 422.



Der Körper, durch welchen man den Schlag hindurchführen will, wird zwischen die Kugeln *d* und *f* gebracht, welche an die durch die Scharniere *r* und *s* beweglichen und durch die Glassäulen *h* isolierten Messingstäbchen angeschraubt sind; *c* wird mit der äußeren Belegung der geladenen Flasche in Verbindung gebracht, *g* durch einen Draht oder ein Metallkettchen mit der Kugel *a* des Ausladers Fig. 420, verbunden, und dann rasch die Kugel *b* desselben dem Knopfe der inneren Belegung genähert.

Wenn man die Kugeln *d* und *f* durch einen sehr dünnen Eisen- oder Platindraht verbindet, so wird dieser erwärmt, wenn ein schwacher Schlag hindurchgeht; eine stärkere Ladung macht ihn rotglühend, und eine noch stärkere bewirkt, daß er in einzelnen geschmolzenen Kügelchen auseinanderfährt, die weithin fortgeschleudert werden.

Schlechte Leiter, welche den Weg des Entladungsschlages unterbrechen, werden, wenn die Anhäufung der Elektricität bedeutend genug ist, zertrümmert oder durchlöchert. Eine Holzscheibe z. B., welche 3 bis 4 Zoll Durchmesser hat und 3 bis 4 Linien dick ist, wird von dem Entladungsschlage durchbohrt. Ebenso ein oder mehrere Kartenblätter, Pappendeckel u. s. w. Um den Versuch zu machen, bringt man den zu durchlöchernden Körper zwischen die beiden Kugeln des Henley'schen Entladers, und zwar so, daß die Kugeln den eingeschobenen Körper berühren.

Fig. 423.



Selbst dünne Glasplatten kann man mit dem Entladungsschlag der Leydner Flasche durchbohren. Über die Anordnung des Versuchs siehe das Lehrbuch und Frick's physikalische Technik.

205 **Der Kondensator.** Im allgemeinen ist jeder Apparat, in welchem gebundene Elektricität angehäuft werden kann, als ein Kondensator zu betrachten. In diesem Sinne gehören also auch die Leydner Flasche und die Franklin'sche Tafel zu den Condensatoren. Man wendet jedoch diese Benennung gewöhnlich nur für solche Apparate an, welche dazu dienen, Elektricität von sehr geringer Spannung durch Verdichtung wahrnehmbar zu machen. Im wesentlichen bestehen alle Kondensatoren aus zwei leitenden Platten, welche durch eine nichtleitende Schicht getrennt sind. Indem wir die unvollkommneren Instrumente dieser Gattung übergehen, soll hier nur von dem Kondensator die Rede sein, den man in Verbindung mit dem Goldblattelektrometer anwendet. Auf das Goldblattelektrometer wird eine Metallplatte aufgeschraubt, wie man Fig. 423

sieht. Diese Platte ist möglichst eben abgeschliffen und auf ihrer oberen Fläche mit einer dünnen isolierenden Schicht von Schellackfirnis versehen. Eine zweite auf dieselbe Weise hergestellte Platte, welche aber außerdem noch mit einem isolierenden Stiele versehen ist, wird mit ihrer gefirnißten Fläche auf die andere gesetzt, so daß die beiden Metallplatten nur durch die dünne Firnisschicht getrennt sind, sonst aber so vollkommen als nur immer möglich auf einander passen. Die Anordnung entspricht der Franklin'schen Tafel vollkommen: die Glasplatte ist durch die dünne Schellackschicht ersetzt, die Platten dienen statt der Belegungen, nur kann man hier die obere Platte nach Belieben abheben, während die beiden Belegungen der Franklin'schen Tafel fest sind. Weil die isolierende Schicht sehr dünn ist, die Platten also einander sehr nahe sind, so ist hier die elektrische Bindung sehr stark. Bringt man die untere Kondensatorplatte mit einer Elektricitätsquelle von geringer Spannung in Berührung, während man die obere ableitend mit dem Finger berührt, so wird der Kondensator ganz auf dieselbe Weise geladen, wie eine Leydner Flasche, deren äußere Belegung nicht isoliert ist, während die innere mit dem Konduktor der Maschine in Verbindung steht. Der ganze Unterschied liegt nur darin, daß man das eine Mal eine Elektricitätsquelle von großer, das andere Mal eine solche von geringer elektrischer Spannung hat; in beiden Fällen aber findet auf gleiche Weise eine Verdichtung der Elektricität statt.

Ist der Kondensator geladen, so wird die obere Platte abgehoben; dadurch wird die bis dahin gebundene Elektricität der unteren Platte frei, sie verbreitet sich über die Goldblättchen und bewirkt eine namhafte Divergenz, während die schwache Elektricitätsquelle ohne Vermittelung des Kondensators keine merkliche Wirkung hervorbringen konnte. Weiter unten, bei der Lehre vom Galvanismus werden wir verschiedene Anwendungen dieses Kondensators kennen lernen.

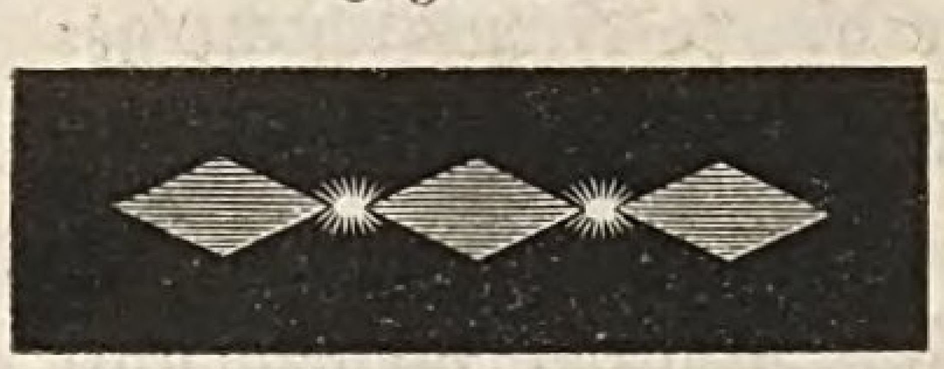
Das elektrische Licht in der Luft und in anderen Gasen. 206 Die Schlagweite, d. i. die Entfernung, auf welche hin noch Funken aus einem elektrisierten Körper gezogen werden können, hängt von der Leitfähigkeit des Körpers, von der Form und Größe seiner Oberfläche und von der Stärke der elektrischen Ladung ab. Aus eckigen Körpern und aus Spitzen strömt die Elektricität von selbst schon bei ganz schwacher Spannung aus, und man beobachtet dabei im Dunkeln glänzende Lichtbüschel, die oft mehrere Zoll lang sind. Bei runden Körpern sind schon sehr starke Ladungen nötig, wenn Büschel hervorsprühen sollen; nähert man ihnen aber einen mit dem Boden in Verbindung stehenden Leiter, so springen Funken, nach Umständen selbst auf große Entfernungen, über, die dann eine dem Blitze ähnliche Linie beschreiben.

Will man die Funken vervielfältigen, so muß man den Leiter, durch welchen die Elektricität in den Boden überströmt, oft unterbrechen; darauf beruhen unter anderm die Blitzröhre und die Blitztafel.

Blitzröhren sind Glasröhren, auf welche man rautenförmige Stanniolblättchen so aufgeklebt hat, daß ihre einander zugekehrten Spitzen etwa so nahe

stehen, wie man Fig. 424 sieht. Gewöhnlich klebt man sie so auf, daß sie eine um die Röhre laufende Schraubenlinie bilden. Wenn man das eine Ende einer solchen Röhre in der Hand hält und das andere an den Konduktor der Maschine bringt, während sie gedreht wird, so sieht man im Dunkeln fortwährend zwischen je zwei Rauten Funken überspringen, so daß eine fast zusammenhängende Lichtlinie auf der Röhre erscheint.

Fig. 424.



Die Blitztafel, Fig. 425, ist eine in einem Holzgestell befestigte Franklin'sche Tafel, deren vordere Belegung durch zwei Reihen sich kreuzender Schnitte von ungefähr $^1/_2$ mm Breite in einzelne rautenförmige Stückchen geteilt ist.

Fig. 425.

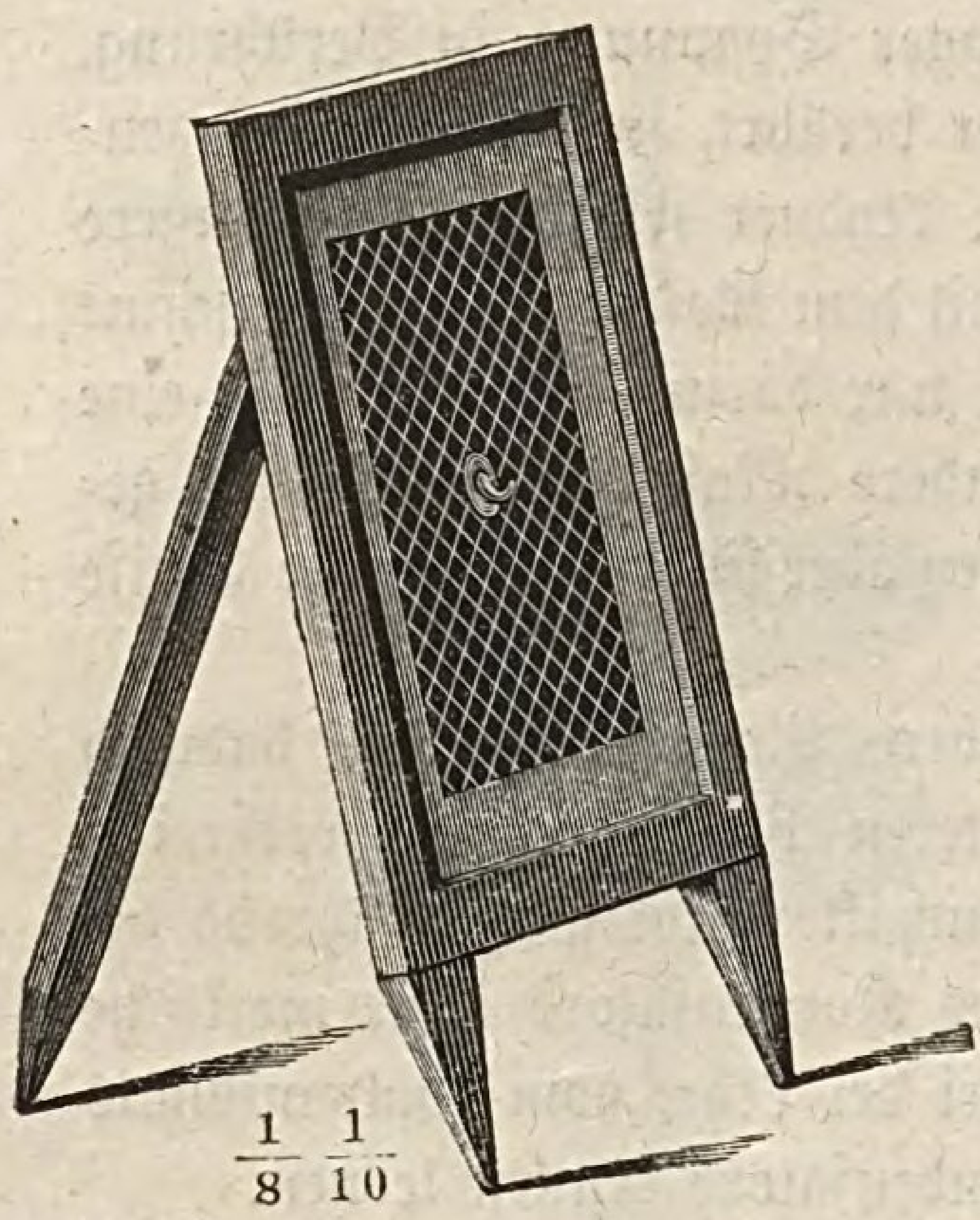
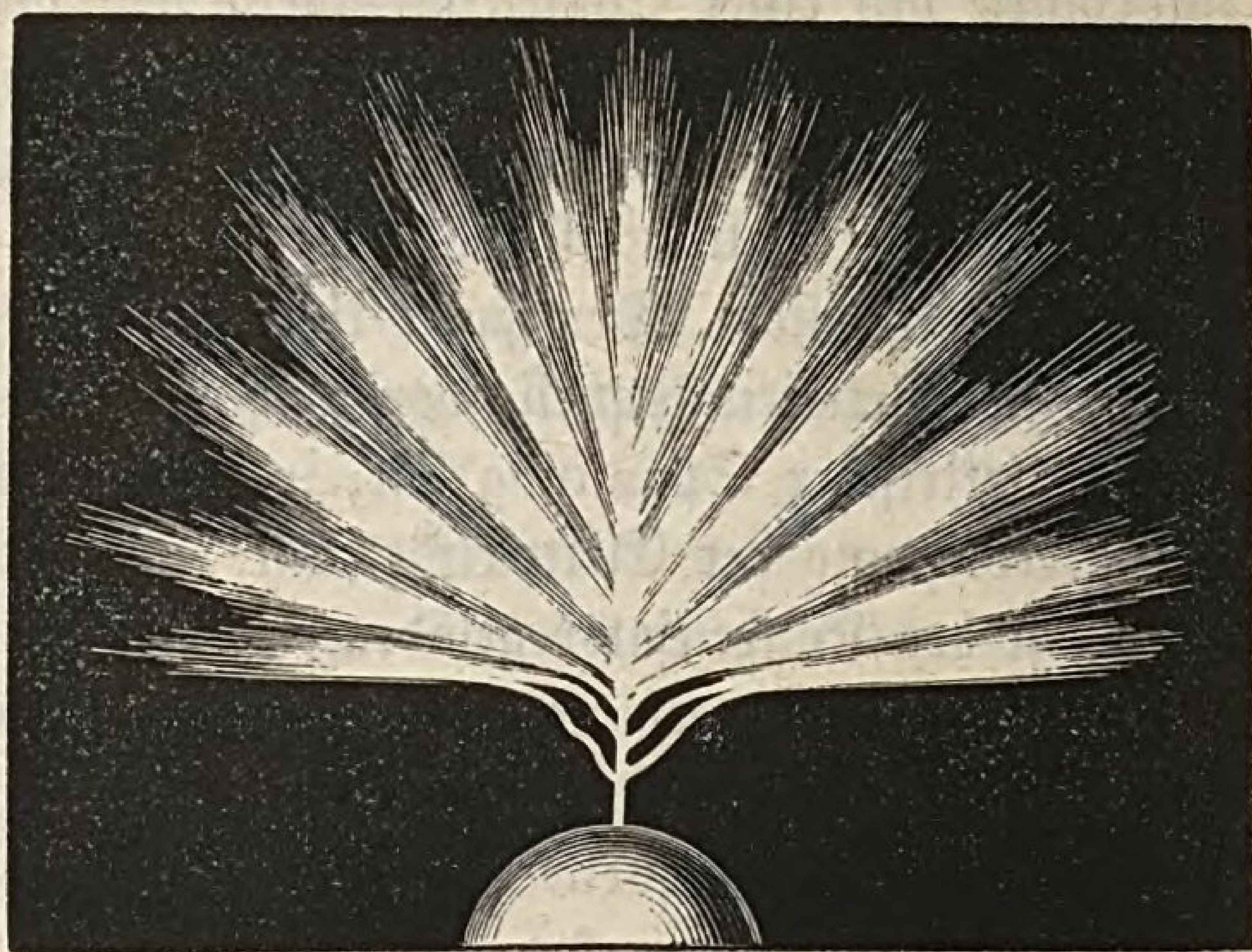


Fig. 426.



Wird nun die hintere Belegung mit dem Boden, die vordere mittels eines auf ihrer Mitte aufgekitteten Hakens mit dem Konduktor der Elektrisiermaschine in leitende Verbindung gebracht, so kann die Ladung nur dadurch zustande kommen, daß die Elektricität auf der Vorderfläche von einer Raute zur anderen überspringt, was zur Folge hat, daß von der Mitte aus Blitze nach allen Seiten hin die ganze Tafel durchzucken. Besonders glanzvoll zeigt sich die Erscheinung bei rascher Entladung der Tafel.

Wenn an dem Konduktor der Elektrisiermaschine ein hervorragender Leiter, z. B. ein Metalldraht, angebracht ist, so sieht man demselben während des Drehens der Maschine im Dunkeln Lichtbüschel entströmen. Fig. 426 stellt einen solchen durch eine sehr kräftige Maschine erzeugten Büschel dar.

Ähnliche Büschel sieht man oft im Dunkeln während des Drehens der Maschine an vielen Stellen derselben hervorströmen.

Nur die ausströmende positive Elektricität bildet kräftige, stark verästelte Büschel; für negativ geladene Konduktoren werden sie viel kleiner und gehen in einen kleinen mit ruhigem Lichte glimmenden Stern über.

Diese Ausströmungs-Erscheinungen zeigen sich auch, wenn man einen in der Hand gehaltenen abgerundeten Metalldraht dem Konduktor der in Thätigkeit befindlichen Maschine nähert, und zwar zeigt sich ein Lichtstern, wenn man den Draht dem positiven, dagegen ein Lichtbüschel, wenn man ihn dem negativen geladenen Konduktor entgegenhält.

In atmosphärischer Luft ist der Funken einer Elektrisiermaschine lebhaft violett, in Kohlensäuregas weiß und intensiv, in Wasserstoffgas rot und schwach, in Wasserdampf gelb, in Alkohol und Ätherdampf apfelgrün.

Die Lichterscheinungen der Maschinenelektricität sind eine treue, wenn auch schwache Nachbildung der elektrischen Lufterscheinungen, welche man bei Gewittern beobachtet.

Elektrisches Licht im verdünnten Raume. Im luftver- 207
dünnten Raume findet das Überspringen des elektrischen Funkens viel leichter und auf größere Entfernung statt als in Luft von gewöhnlicher Dichte. Auch breitet sich in ihm das Licht um so mehr aus und wird aber auch um so matter, je weiter die Luftverdünnung getrieben wird.

Fig. 427.

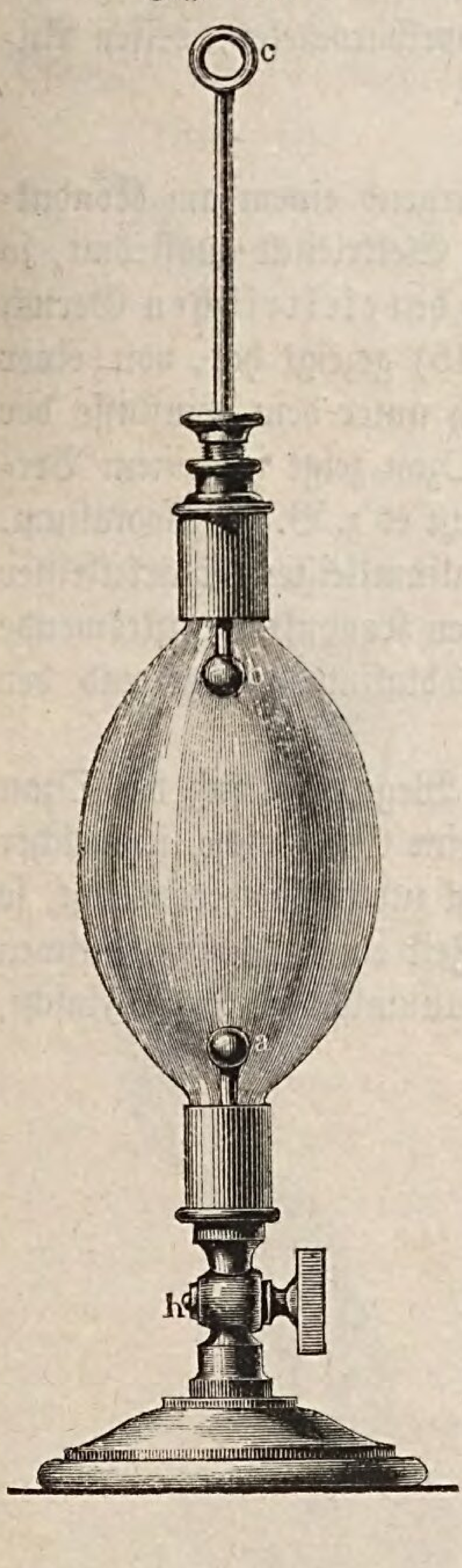
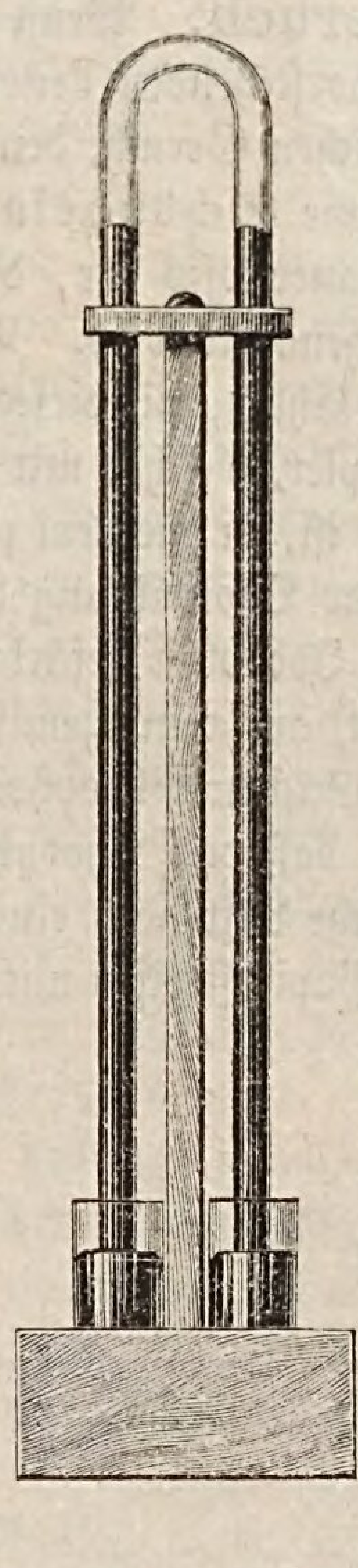


Fig. 428.



Um Versuche über das elektrische Licht im luftverdünnten Raume anzustellen, gebraucht man gewöhnlich das elektrische Ei, Fig. 427; es besteht aus einem elliptisch geformten Glasgefäß, welches oben und unten mit Metallfassungen versehen ist; die untere, welche mit einem Hahn *h* versehen ist und eine in das Glasgefäß hineinragende Kugel *a* trägt, kann auf die Luftpumpe aufgeschraubt und dann der innere Raum evakuiert werden. Die obere Fassung ist mit einer Stopfbüchse versehen, durch welche ein oben mit dem Ringe *c*, unten mit der Kugel *b* endigendes Messingstäbchen,

hindurchgeht. Durch Auf- oder Niederschieben dieses Stäbchens kann man die Entfernung der beiden Kugeln *a* und *b* beliebig ändern.

Ist die Luft im Apparat möglichst verdünnt, so wird der Hahn *h* geschlossen, und die untere Fassung mit dem Boden in leitende Verbindung gesetzt. Wenn man nun mittels des Ausladers, Fig. 420, von dem Konduktor der Elektrisiermaschine Funken auf den Ring *c* überschlagen läßt, so strömen garbenförmige Lichtmassen zwischen den beiden Kugeln über, welche das Ei mit einem milden, purpurfarbenen Lichte erfüllen. Läßt man allmählich Luft einströmen, so nimmt die Ausdehnung der Lufterscheinung mehr und mehr ab und nähert sich mehr und mehr der gewöhnlichen Form des elektrischen Funkens.

Picard bemerkte (1675) zuerst, daß ein Barometer im Dunkeln leuchtet, wenn das Quecksilber auf- und niederschwankt, und bald überzeugte man sich, daß diese Erscheinung von der durch die Reibung des Quecksilbers an den Wänden der Röhre entwickelten Elektricität herrühre. Um das elektrische Licht in der Toricelli'schen Leere zu beobachten konstruierte Cavendish (1731 bis 1810) das Fig. 428 (a. v. S.) dargestellte Doppelbarometer, dessen Anwendung wohl ohne weitere Erklärung verständlich ist.

208 **Der elektrische Geruch.** Wenn aus irgend einem am Konduktor der Elektrisiermaschine hervorstehenden Leiter die Elektricität ausströmt, so empfindet man einen eigentümlichen Geruch, den man den elektrischen Geruch nennt. Dieser Geruch rührt, wie Schönbein (1845) gezeigt hat, von einer besonderen Modifikation des Sauerstoffs her, die sich unter dem Einflusse der Elektricität bildet, und Ozon genannt wird. Das Ozon zeigt in seinem Verhalten viele Ähnlichkeit mit dem Chlor; wie dieses zersetzt es z. B. das Jodkalium. Hält man nämlich ein Stück Papier, welches mit Jodkaliumkleister (Stärkekleister mit etwas Jodkalium) bestrichen ist, in das dem positiven Konduktor entströmende Büschellicht, so wird infolge der Ozonbildung das Jodkalium zersetzt und der Kleister von dem freiwerdenden Jod blau gefärbt.

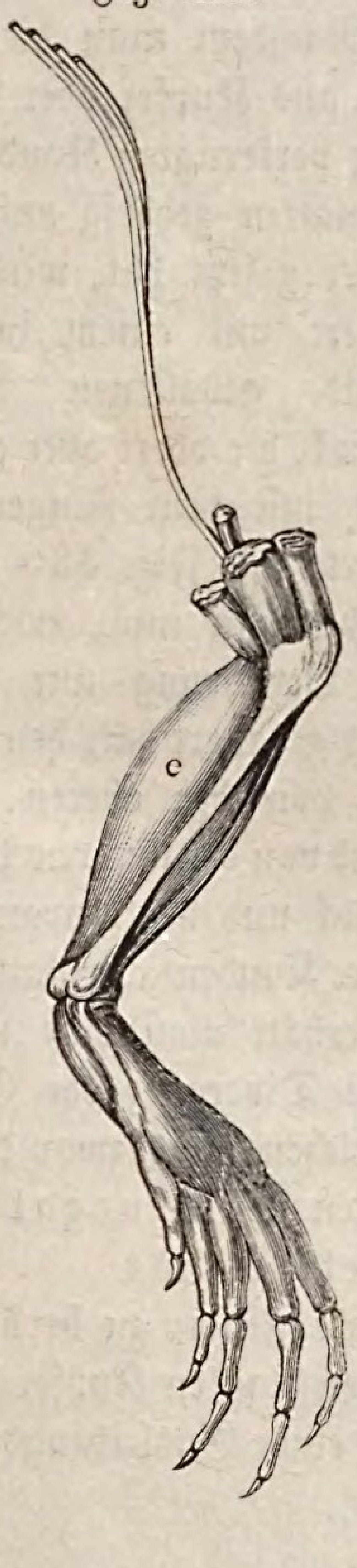
Auch ohne alle Elektricität, auf rein chemischem Wege, läßt sich das Ozon erzeugen. Bringt man ein Stückchen Phosphor in eine Glasflasche, in welcher sich nur so viel Wasser befindet, daß das Phosphorstück zur Hälfte herausragt, so zeigt die in der Flasche befindliche Luft nach einiger Zeit einen höchst intensiven Ozongeruch; hängt man einen Papierstreifen mit Jodkaliumkleister in die Flasche, so wird der Kleister blau.

Drittes Kapitel.

Vom Galvanismus.

Galvani's Entdeckung. Im Jahre 1786 machte Galvani zu Bologna eine Entdeckung, durch welche ein ganz neues Feld für die Physik eröffnet wurde. Diese Entdeckung war die Beobachtung der scheinbar unbedeutenden Thatsache, daß frisch präparierte Froschschenkel, welche mittels kupferner Häkchen an einem eisernen Balkongeländer aufgehangen waren und deren Nerven die Häkchen berührten, in Zuckungen geriethen, so oft die Schenkelmuskeln durch den Wind mit dem eisernen Geländer in Berührung gebracht wurden. 209

Fig. 429.



Den Galvani'schen Fundamentalversuch kann man leicht in folgender Weise anstellen: Man präpariere den Unterschenkel eines frisch getöteten und enthäuteten Frosches so, daß noch ein möglichst großes Stück des zum großen Wadenmuskel *e* führenden Nerven daran bleibt, wie Fig. 429 zeigt. Legt man dieses Präparat auf eine Glasplatte, berührt man dann das Muskelfleisch mit einem Streifchen Zinkblech, den Nerven mit einem Stücke Kupferdraht, so zuckt der Schenkel, sobald man die beiden Metalle in Berührung bringt.

Anfangs glaubte man, diese Erscheinung durch eine Art Nervenflüssigkeit erklären zu können, welche dem elektrischen Fluidum ähnlich sein sollte; man dachte sich den organischen Körper in Beziehung auf diese Flüssigkeit ungefähr wie eine Leydner Flasche, deren Belegungen einerseits die Nerven, andererseits die Muskeln sind. Eine Entladung sollte stattfinden, sobald Nerven und Muskeln in leitende Verbindung

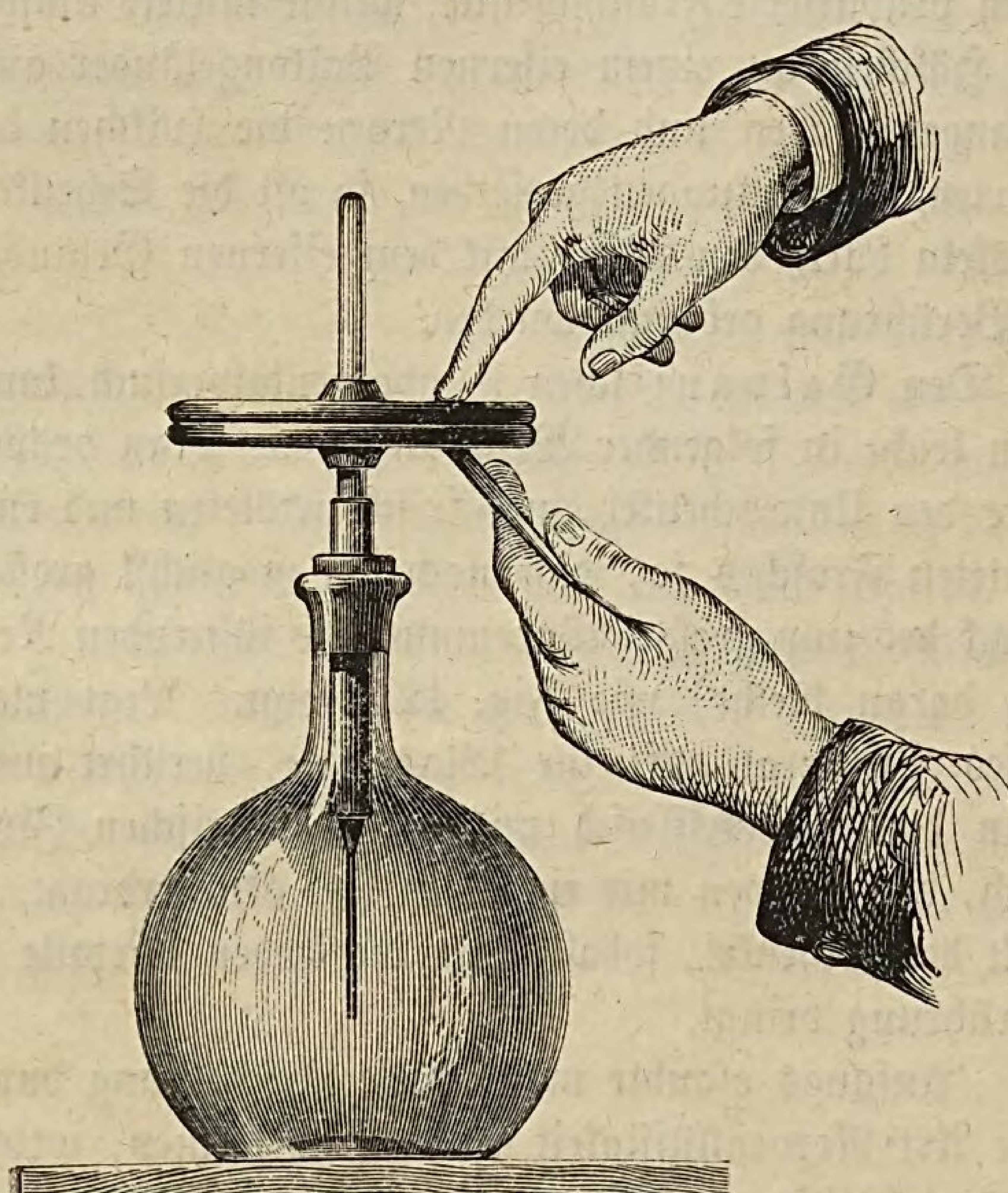
gebracht werden, was bei dem Versuche Galvani's durch die Kupferhäkchen und das eiserne Geländer der Fall war.

Alexander Volta (1745 bis 1827) wiederholte Galvani's Versuche mit unermüdlicher Aufmerksamkeit und fand bald, daß ein zum Gelingen des Versuches sehr wichtiger Umstand bis dahin ganz übersehen worden war. Um nämlich eine sichere Wirkung zu haben, ist es durchaus nötig, daß der Leitungsbogen, welcher die Nerven und Muskeln verbindet, aus zwei verschiedenen Metallen besteht, welche mit einander in Berührung sind.

Volta behauptete deshalb, daß der Froschschenkel nicht wie eine Leydner Flasche zu betrachten sei, daß die hier wirkende Elektricität weder in den Nerven noch in den Muskeln, sondern durch die Berührung der beiden Metalle entwickelt werde und daß sie mit dem gewöhnlichen elektrischen Fluidum vollkommen identisch sei.

210 **Volta's Fundamentalversuch.** Den Beweis, daß die Berührung verschiedener Metalle die Quelle einer Elektricitätsentwickelung sei, suchte Volta mit Hülfe des in §. 205 besprochenen Kondensators und zwar durch folgendes Experiment zu führen, welches man deshalb auch als Volta'schen Fundamentalversuch bezeichnet.

Fig. 430.



Nachdem man die beiden aus Kupfer oder Messing verfertigten Kondensatorplatten gehörig auf einander gesetzt hat, wird die untere mit einem in der Hand gehaltenen Stück Zink, die obere aber ableitend mit dem Finger berührt, wie Fig. 430 zeigt. Zieht man nun, nachdem die Berührung nur kurze Zeit gedauert hat, den Finger von der oberen, das Zink von der unteren Platte zurück und hebt darauf die obere Kondensatorplatte ab, so erhält man eine merkliche Divergenz der Goldblättchen, und zwar divergieren sie mit negativer Elektricität.

Statt die obere Kondensatorplatte ableitend mit dem Finger zu berühren, wie es Fig. 430 zeigt, kann man dieselbe auch durch einen blanken Kupfer- oder Messingdraht mit einer größeren Metallmasse, etwa mit einer Gasleitungsröhre in leitende Verbindung bringen.

Nach Volta ist der Sitz der Elektricitätsentwickelung, welche durch diesen Versuch nachgewiesen wurde, die Berührungsstelle zwischen dem Kupfer oder dem Messing der unteren Kondensatorplatte und dem Zink. Der Volta'sche Fundamentalversuch läßt sich aber auch durch die Annahme erklären, daß der Sitz der Elektricitätsentwickelung in der Berührungsstelle des Zinks mit der mehr oder weniger feuchten Hand zu suchen sei. In der That gelingt der Versuch weit sicherer, wenn man die Hand mit etwas Salzwasser befeuchtet.

Daß aber wirklich an der Berührungsstelle des Zinks mit angesäuertem Wasser oder mit einer Salzlösung eine Elektricitätsentwickelung stattfindet, läßt sich durch folgende Modifikation des Volta'schen Fundamentalversuchs nachweisen. Man schraube auf das Goldblattelektrometer, Fig. 430, als untere Kondensatorplatte statt der messingenen eine solche von Zink auf, während als obere die messingene beibehalten wird. Wird nun die obere Kondensatorplatte in der vorhin beschriebenen Weise abgeleitet, während man die untere mit einem Läppchen berührt, welches mit einer Salzlösung oder mit einer verdünnten Säure befeuchtet ist, so erhält die untere Kondensatorplatte eine eben so starke Ladung negativer Elektricität wie bei dem Volta'schen Fundamentalversuch in ursprünglicher Form.

Dieser Versuch zeigt zweifellos, daß Zink in Berührung mit angesäuertem Wasser eine negative elektrische Ladung annimmt.

Der Erfolg des Volta'schen Fundamentalversuchs läßt sich also auch so erklären, daß die negativ-elektrische Ladung, welche das Zink durch Berührung mit der feuchten Hand annimmt, auf die Kondensatorplatte übergeht, ohne daß man eine weitere Elektricitätsentwickelung an der Berührungsstelle des Zinks mit dem Kupfer oder dem Messing anzunehmen nötig hätte.

Die Elektricitätserregung durch Berührung von Metallen und Flüssigkeiten ist zweifellos nachgewiesen. Ob aber auch bei der Berührung verschiedenartiger Metalle Elektricität entwickelt werde, oder ob sich die Versuche, welche dies beweisen sollen, nicht auch noch auf andere Weise erklären lassen, darüber sind die Physiker noch nicht einig. Jedenfalls aber läßt sich die Theorie der Volta'schen Säule, welche in §. 212 besprochen werden wird, viel leichter und einfacher entwickeln, wenn man die in derselben auftretende Elektricität nur aus der Berührung zwischen den Metallen und der Flüssigkeit ableitet, als wenn man außerdem auch noch eine Elektricitätsentwickelung an der Berührungsstelle verschiedenartiger Metalle annimmt.

Aus diesem Grunde wird in den folgenden Paragraphen von einer Elektricitätsentwickelung durch Berührung heterogener Metalle keine Rede mehr sein.

Die elektromotorische Kraft. Wenn beide Kondensatorplatten aus Kupfer bestehen und die obere metallisch abgeleitet wird, während man die untere mit einem in Salzwasser oder verdünnter Säure getauchten Läppchen berührt, so nimmt jetzt die untere kupferne Kondensatorplatte gleichfalls eine 211

negative Ladung an, welche aber **bedeutend** geringer ist, als man sie für Zink gefunden hat.

Wenn bei diesem Versuch die untere Kondensatorplatte aus **Platin** besteht, so nimmt das **Platin** in Berührung mit der verdünnten Schwefelsäure eine schwach **positive Ladung** an.

Bezeichnet man mit — 1 die elektrische Ladung, welche Kupfer in Berührung mit stark verdünnter Schwefelsäure annimmt, so ist ungefähr

— 10	die elektrische Ladung,	welche	**Zink**,		
— 5	„	„	„	, „	**Eisen** und
+ 2,5	„	„	„	, „	**Platin**

in Berührung mit derselben Flüssigkeit erhält.

An der Berührungsfläche eines Metalles und einer Flüssigkeit ist also eine Kraft thätig, welche die bis dahin verbundenen Elektricitäten in ähnlicher Weise zerlegt, wie man es an der Berührungsfläche geriebener Körper beobachtet, und deshalb auch **elektromotorische Kraft** genannt wird.

Die Art und die Stärke des elektrischen Gegensatzes, in welchen die beiden in Berührung gebrachten Körper treten, hängt von ihren chemischen Eigenschaften ab. Im allgemeinen werden diejenigen Metalle in Berührung mit einer bestimmten Flüssigkeit am stärksten negativ erregt, welche am stärksten von derselben angegriffen werden.

Die elektromotorische Kraft, welche den elektrischen Gegensatz der beiden sich berührenden Stoffe hervorruft, bewirkt auch, daß dieser Gegensatz unter allen Umständen in unveränderter Stärke erhalten bleibt. Wenn also z. B. Zink und verdünnte Schwefelsäure mit einander in Berührung sind, so wird das Zink stets um eine bestimmte Größe mehr negativ, oder, was dasselbe ist, weniger positiv elektrisch sein als die Flüssigkeit.

Wird auf eine isolierte, mit verdünnter Schwefelsäure getränkte Tuchscheibe T, Fig. 431 I, eine Zinkplatte gelegt, so wird die Tuchscheibe positiv, die Zinkplatte negativ elektrisch erregt. Bezeichnen wir die positive Spannung, welche unter diesen Umständen die Tuchscheibe annimmt, mit $+ E$, so ist die über die Zinkplatte sich verbreitende Spannung negativer Elektricität gleich $- E$.

In diesem Falle ist die elektrische Differenz der beiden Platten gleich $2E$, d. h. die Zinkplatte ist um eine mit $2E$ bezeichnete Größe stärker negativ elektrisch, oder, was dasselbe ist, um $2E$ weniger stark positiv elektrisch geladen, als die Tuchscheibe, und diesen Gegensatz behält das Scheibenpaar bei, wie viel Elektricität man auch von außen her zuführen mag. Alle von außen her zugeführte Elektricität wird sich frei über das ganze Scheibenpaar verbreiten.

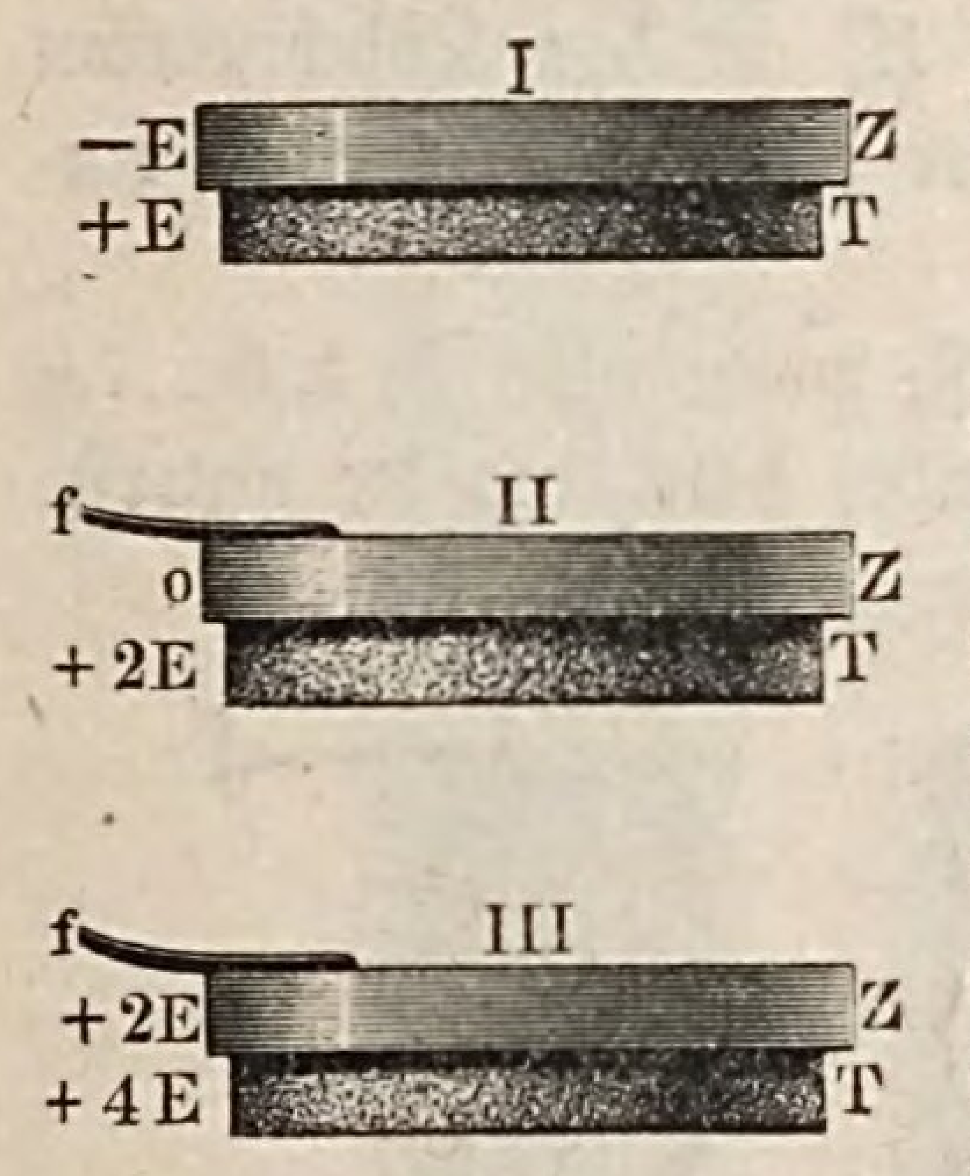
Wird dem Scheibenpaar von außen her eine solche Menge positiver Elektricität zugeführt, daß sich die Ladung $+ E$ über das Ganze verbreitet, so wird die Ladung der Zinkplatte $- E + E = 0$, die der Zinkscheibe $+ E + E = 2E$.

Denselben Erfolg wird es haben, wenn man die Zinkplatte ableitend berührt, Fig. 431 II, und ihr dadurch ihre negative Ladung $- E$ entzieht. Die

Ladung der Zinkscheibe wird alsdann gleich 0, die der Tuchscheibe gleich $+ 2E$, da dieselbe unter allen Umständen um die Größe $2E$ stärker positiv elektrisch geladen sein muß.

Wird dem Scheibenpaar, Fig. 431 I, von außen her die Ladung $+ 3E$ zugeführt, so wird die elektrische Ladung der Zinkscheibe gleich $+ 2E$, die der Tuchplatte $+ 4E$ werden (Fig. 431 III); kurz die elektrische Differenz der beiden Scheiben wird stets dieselbe, nämlich $2E$ bleiben.

Fig. 431.

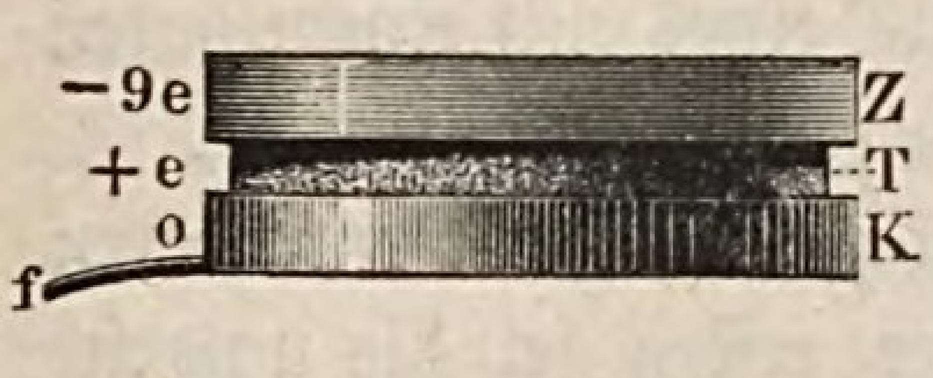


Die Volta'sche Säule. Die elektrische 212
Spannung, welche eine Metallplatte in Berührung mit einer erregenden Flüssigkeit annimmt, ist so gering, daß es eines guten, mit einem Goldblattelektroskop verbundenen Kondensators bedarf, um dieselbe nachzuweisen. Volta hat aber gezeigt, daß sich diese elektrische Spannung beliebig steigern läßt, wenn man immer in gleicher Ordnung zwei verschiedenartige Metallplatten und feuchte Scheiben auf einander legt und so eine Säule aufbaut.

Zum Aufbau seiner Säule wandte Volta Kupferplatten, Zinkplatten und Tuchscheiben an, welche mit angesäuertem Wasser oder mit Salzwasser getränkt waren.

Wenn eine Kupferplatte K, Fig. 432, auf welcher eine mit angesäuertem Wasser getränkte Tuchscheibe T liegt, durch einen Kupferdraht f mit dem Boden in leitende Verbindung gebracht wird, so wird alle ihre freie Elektricität abgeleitet, die elektrische Ladung der Tuchscheibe aber wird $+ e$, wenn wir mit e die elektrische Differenz zwischen dem Kupfer und der Flüssigkeit bezeichnen. Wird auf die feuchte Tuchscheibe nun eine Zinkplatte gelegt, so wird diese um die Größe $10\,e$ mehr negativ elektrisch als die Tuchscheibe und nimmt also die elektrische Ladung $- 9e$ an, da ja die elektrische Differenz zwischen Zink und dem gesäuerten Wasser 10 mal so groß ist, als die zwischen Kupfer und der Flüssigkeit.

Fig. 432.



Eine derartige Kombination einer Kupferplatte und einer Zinkplatte, zwischen denen eine feuchte Scheibe liegt, wird ein einfaches oder auch ein Volta'sches Element genannt.

Wird auf das erste Volta'sche Element in gleicher Ordnung ein zweites gelegt, wie Fig. 433 (a. f. S.) zeigt, so geht die negative Elektricität von der Zinkplatte Z auf das obere Volta'sche Element über, während eine gleiche Menge positiver Elektricität durch den Draht f abgeleitet wird. Die zwischen der Flüssigkeit der Tuchscheibe T und den beiden sie berührenden Metallplatten thätige elektromotorische Kraft ersetzt aber alle abströmende Elektricität der Art, daß der elektrische Zustand des untersten Volta'schen Elementes unverändert erhalten bleibt, daß also die Zinkplatte Z die elektrische Ladung $- 9e$ beibehält.

Ein elektrisches Gleichgewicht wird aber erst dann eintreten können, wenn auf das obere Volta'sche Element so viel negative Elektricität übergegangen ist, daß auch die Kupferplatte K' gleichfalls die Ladung $-9e$ angenommen hat. Alsdann aber wird die Ladung

der Tuchscheibe T' gleich $-9e + e = -8e$,
die der Zinkscheibe Z' gleich $-8e - 10e = -18e$ sein.

Die negativ elektrische Ladung der Zinkplatte Z' in der Kombination Fig. 433 ist also doppelt so groß als die Ladung der Zinkplatte Z eines einfachen Volta'schen Elements, Fig. 432.

Auf gleiche Weise kann man weiter schließen, daß, wenn man $3, 4, 5 \ldots n$ Volta'sche Elemente in gleicher Ordnung auf einander baut und die unterste

Fig. 433.

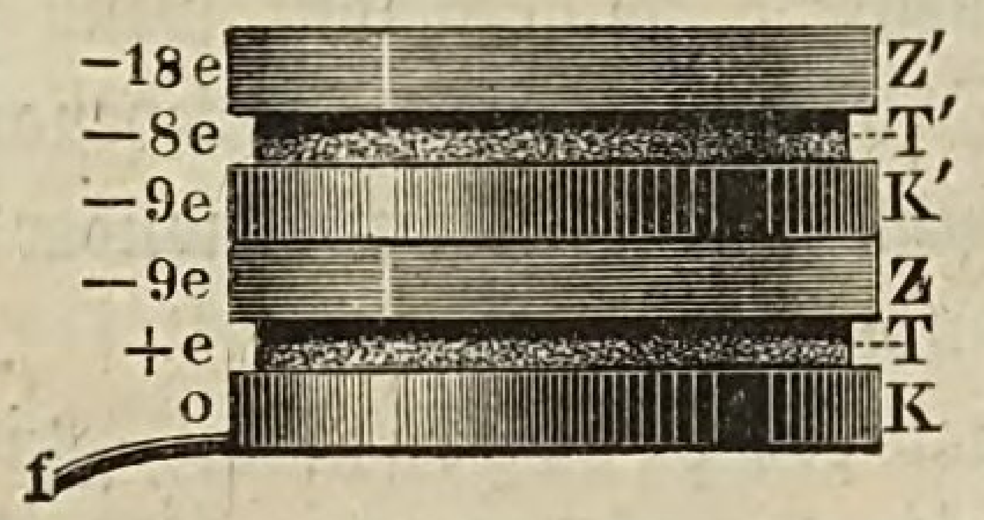
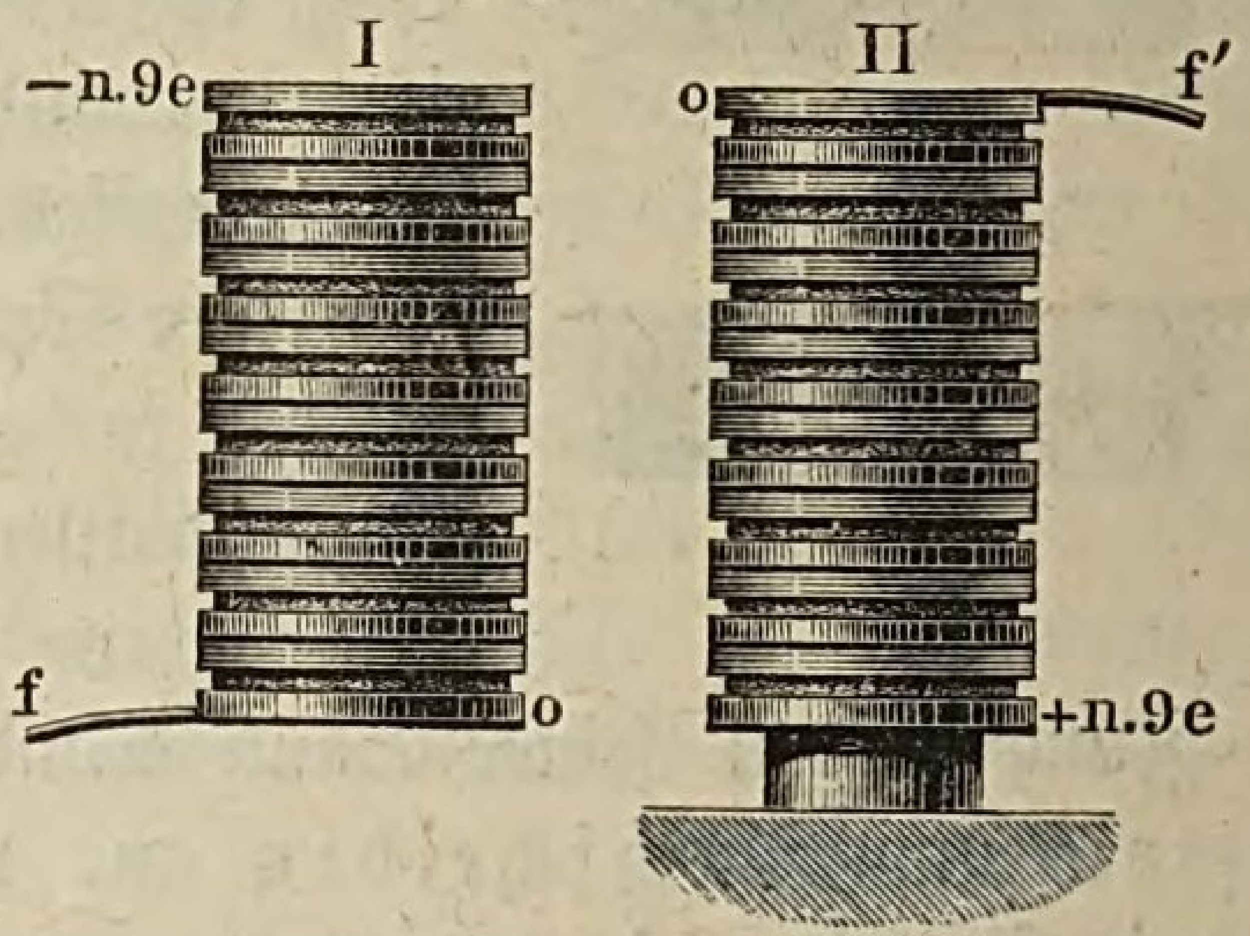


Fig. 434.



Kupferplatte ableitend berührt, alsdann die negativ elektrische Ladung der obersten Zinkplatte $3, 4, 5 \ldots n$ mal so groß sein wird, als für ein einzelnes Volta'sches Element.

Die Richtigkeit dieses Satzes läßt sich leicht mittels eines mit einem guten Kondensator versehenen Goldblattelektrometers auch experimentell bestätigen.

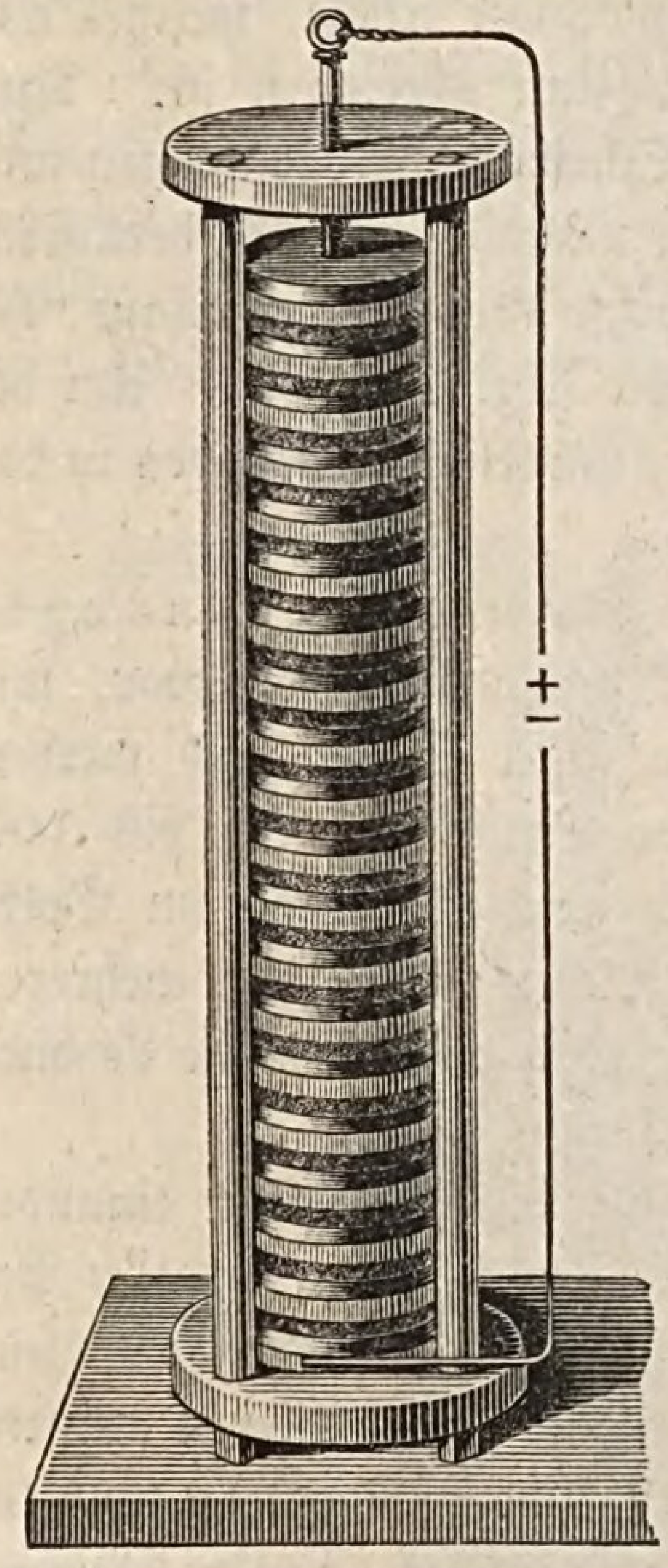
Fig. 434 stellt zwei in ganz gleicher Weise aufgebaute Säulen dar, deren jede aus n Volta'schen Elementen besteht. Bei der ersten sei die unterste Kupferplatte ableitend berührt, so ist hier die Spannung der freien Elektricität gleich 0, am oberen Ende der Säule I aber ist sie, wie wir gesehen haben, gleich $-n.9e$. Wenn nun aber die unterste Kupferplatte der Säule II isoliert ist etwa dadurch, daß sie auf einer Glasplatte liegt, während die oberste Zinkplatte derselben ableitend berührt ist, so ist klar, daß die Spannung der freien Elektricität am oberen Ende der Säule II gleich 0, am unteren Ende derselben dagegen gleich $+n.9e$ ist.

Wird nun die Säule I so auf die Säule II gesetzt, daß die ableitend berührte Kupferplatte von I auf die ableitend berührte Zinkplatte von II zu liegen kommt, und werden alsdann die ableitenden Drähte entfernt, so haben wir eine einzige Säule von $2n$ Plattenpaaren, welche vollständig isoliert ist, und welche an ihrem Zinkende die negativ elektrische Ladung $-n.9e$, an ihrem anderen Ende aber die positiv elektrische Ladung $+n.9e$ hat.

Das Zinkende dieser Säule wird der negative, das Kupferende der positive Pol genannt.

Die Volta'sche Säule wird gewöhnlich zwischen drei in einem Brett von trockenem Holze befestigten Stäben von Glas aufgebaut, wie Fig. 435 zeigt.

Fig. 435.



Um eine innigere Berührung der zusammengehörigen Kupfer- und Zinkplatten zu erzielen, werden dieselben zusammengelötet.

Wenn beide Pole der Volta'schen Säule isoliert, oder überhaupt nicht mit einander leitend verbunden sind, so sagt man, die Säule sei offen. An den isolierten Polen der offenen Säule lassen sich elektrische Spannungserscheinungen beobachten, welche um so kräftiger sind, je größer die Anzahl der Plattenpaare ist.

Wenn aber die beiden Pole der Volta'schen Säule etwa durch einen Draht mit einander in leitende Verbindung gebracht werden, so sagt man, die Säule oder Kette sei geschlossen. Von dem positiven Pol strömt nun die positive Elektricität durch den Schließungsdraht fortwährend nach dem negativen Pole hin, während die negative Elektricität den Schließungsdraht in entgegengesetzter Richtung durchströmt; in der Säule selbst aber strömt positive Elektricität beständig dem positiven, negative Elektricität dem negativen Pole zu. Demgemäß sind im Stromkreis, d. i. in der Bahn der Elektricitäten, zwei Ströme vorhanden; um aber Mißverständnisse zu vermeiden, ist man übereingekommen, unter Richtung des Stromes stets diejenige Richtung zu verstehen, welche die positive Elektricität im Stromkreis hat. Demzufolge hat der Strom innerhalb der Säule die Richtung vom Zink zum Kupfer, dagegen im Schließungsdrahte die Richtung vom Kupfer zum Zink.

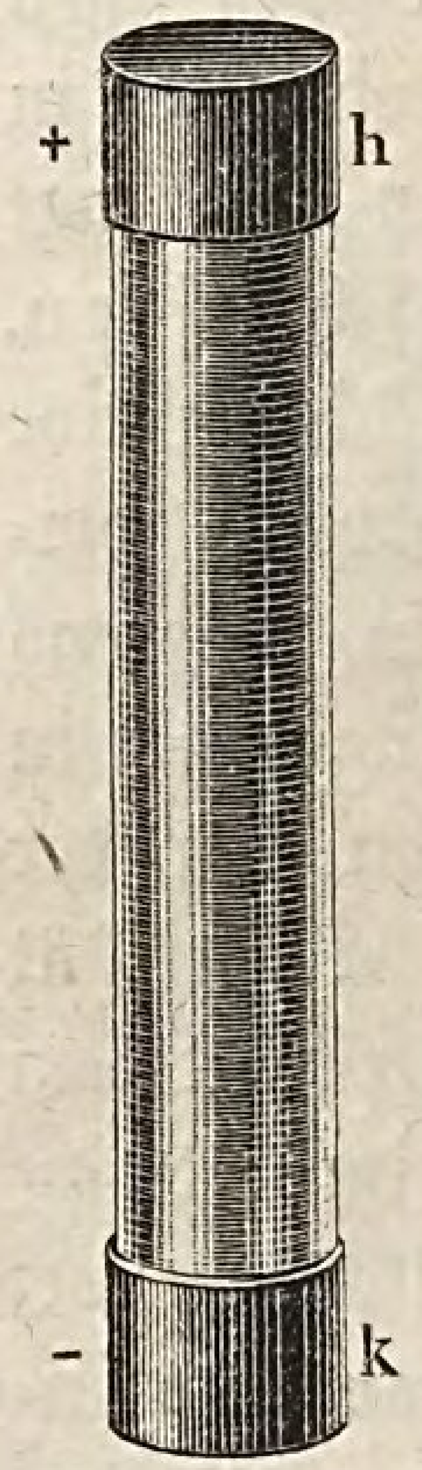
Jede Vorrichtung, mittels deren man einen fortdauernden elektrischen Strom erzeugen kann, wird ein Rheomotor (Stromerzeuger) genannt. Stromerzeugende Apparate, welche nach dem Princip der Volta'schen Säule konstruiert sind, werden häufig auch als galvanische Batterieen oder als galvanische Ketten bezeichnet. Die elektrischen Ströme, welche sie liefern, werden auch hydro-elektrische Ströme genannt, da wässerige Flüssigkeiten einen wesentlichen Bestandteil dieser Batterieen bilden.

Die Wirkungen der Ströme, welche man gewöhnlich als galvanische bezeichnet, werden wir später besprechen.

Die trockene Säule. Ganz nach dem Princip der Volta'schen Säule hat Zamboni (1812) eine Säule konstruiert, in welcher der feuchte Leiter durch eine Papierscheibe ersetzt ist, und welche deshalb trockene Säule genannt wird. 213

Man kann die trockenen Säulen am leichtesten aus unächtem Gold- und Silberpapier konstruieren. Zu diesem Zwecke klebt man immer einen Bogen unächten Silberpapiers (Zinn) und einen Bogen unächten Goldpapiers (Kupfer) mit der Papierseite zusammen, so daß man ein Papierblatt erhält, welches auf der einen Seite mit Kupfer, auf der anderen mit Zinn überzogen ist. Aus den so zusammengeklebten Bogen werden dann die Scheibchen ausgeschlagen und so auf einander gesetzt, daß ihre ungleichnamigen Metallseiten sich berühren. Gewöhnlich sind die trockenen Säulen in wohlgefirnißte Glasröhren gefaßt, die an beiden Enden mit Metallkappen versehen sind, wie Fig. 436 zeigt. Um die vollständige Berührung der Plattenpaare zu sichern, müssen die Scheiben in der Glasröhre auf einander gepreßt werden.

Fig. 436.



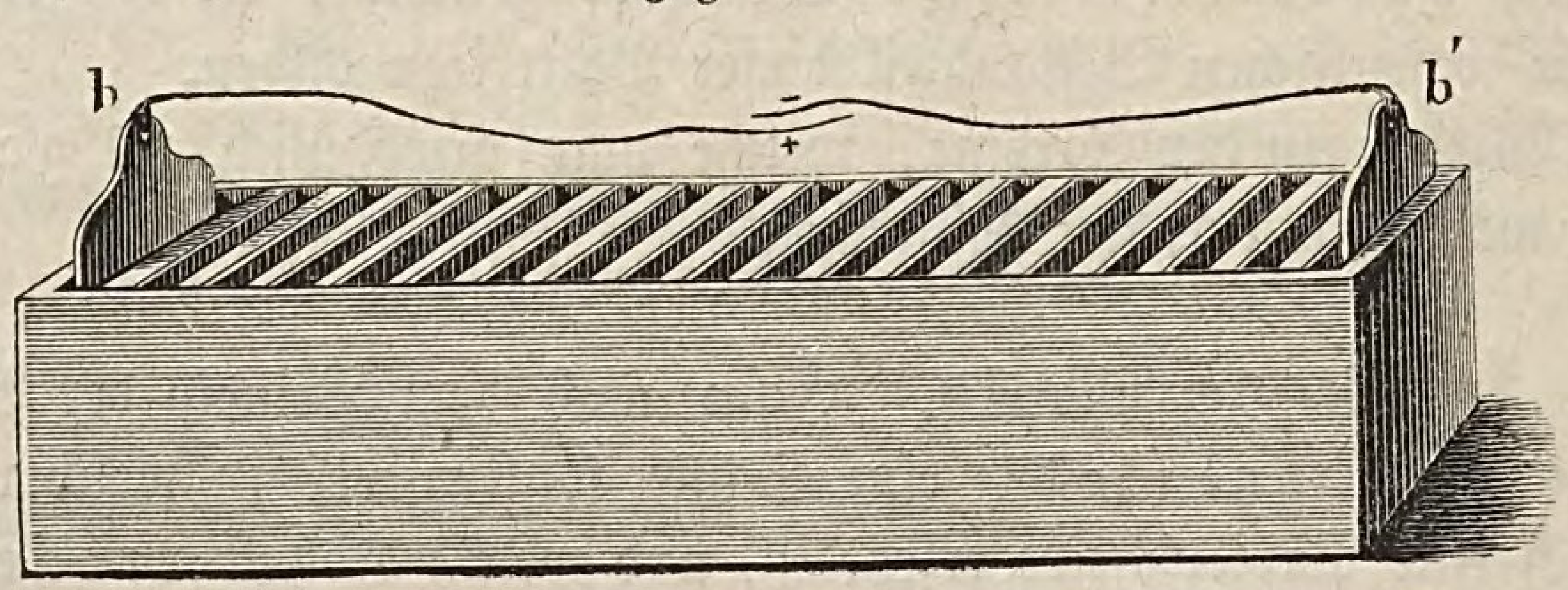
Die trockene Säule bringt vorzugsweise Spannungserscheinungen, aber keine merklichen Stromwirkungen hervor, wie wir sie bei der gewöhnlichen Volta'schen Säule bald werden kennen lernen. Eine Zamboni'sche Säule von 80 bis 100 Paaren bringt schon ohne Kondensator eine Divergenz am Goldblattelektrometer hervor. Mit einer solchen Säule von mehreren Tausend Paaren kann man selbst eine recht dünnwandige Leydner Flasche laden.

Wenn man zwei Zamboni'sche Säulen neben einander aufbaut, so daß der positive Pol der einen und der negative Pol der anderen nach oben gerichtet ist, so wird ein elektrisches Pendel zwischen beiden Polen beständig hin und her oscillieren müssen. Hierauf gründet sich das sogenannte elektrische perpetuum mobile.

Ein zwischen zwei solchen Zamboni'schen Säulen hängendes Goldblättchen wird nach dem einen oder dem anderen Pole hin ausschlagen, wenn es nur eine ganz schwache positive oder negative Ladung erhält. Darauf beruht die Konstruktion des Bohnenberger'schen Elektroskops.

214 **Verschiedene Formen der Volta'schen Säule.** Die oben besprochene Volta'sche Säule war der erste Apparat, mit Hülfe dessen man kontinuierliche hydroelektrische Ströme erzeugte. Allein diese Form bietet mannigfache Mißstände. Die unteren Scheiben nämlich werden durch das Gewicht

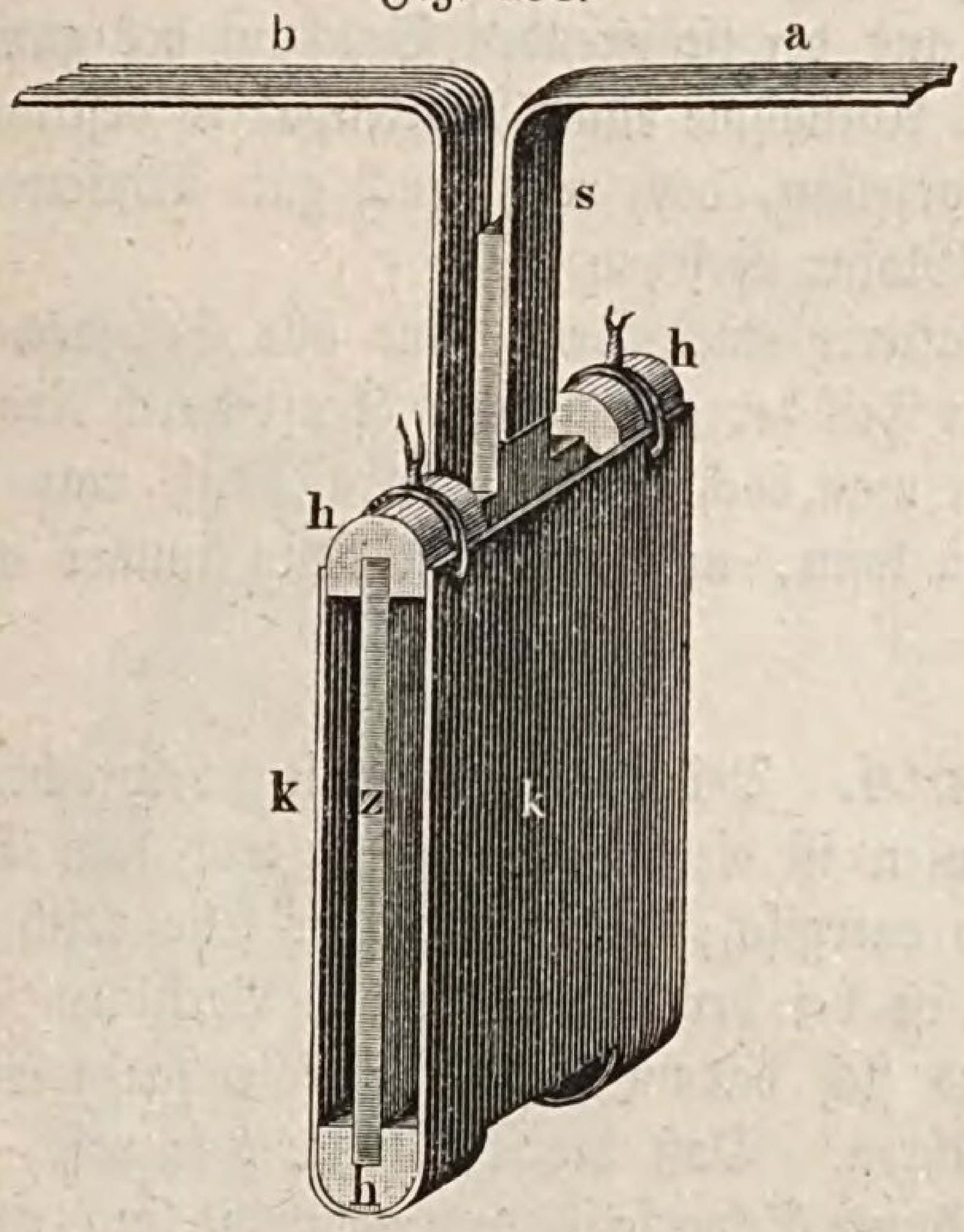
Fig. 437.



der oberen zusammengedrückt, so daß die feuchten Tuchscheiben ausgepreßt und trocken werden, während die Flüssigkeit an der Seite der Säule herabrinnt; dadurch wird aber eine leitende Verbindung zwischen den einzelnen Plattenpaaren hervorgebracht, welche den Totaleffekt schwächt.

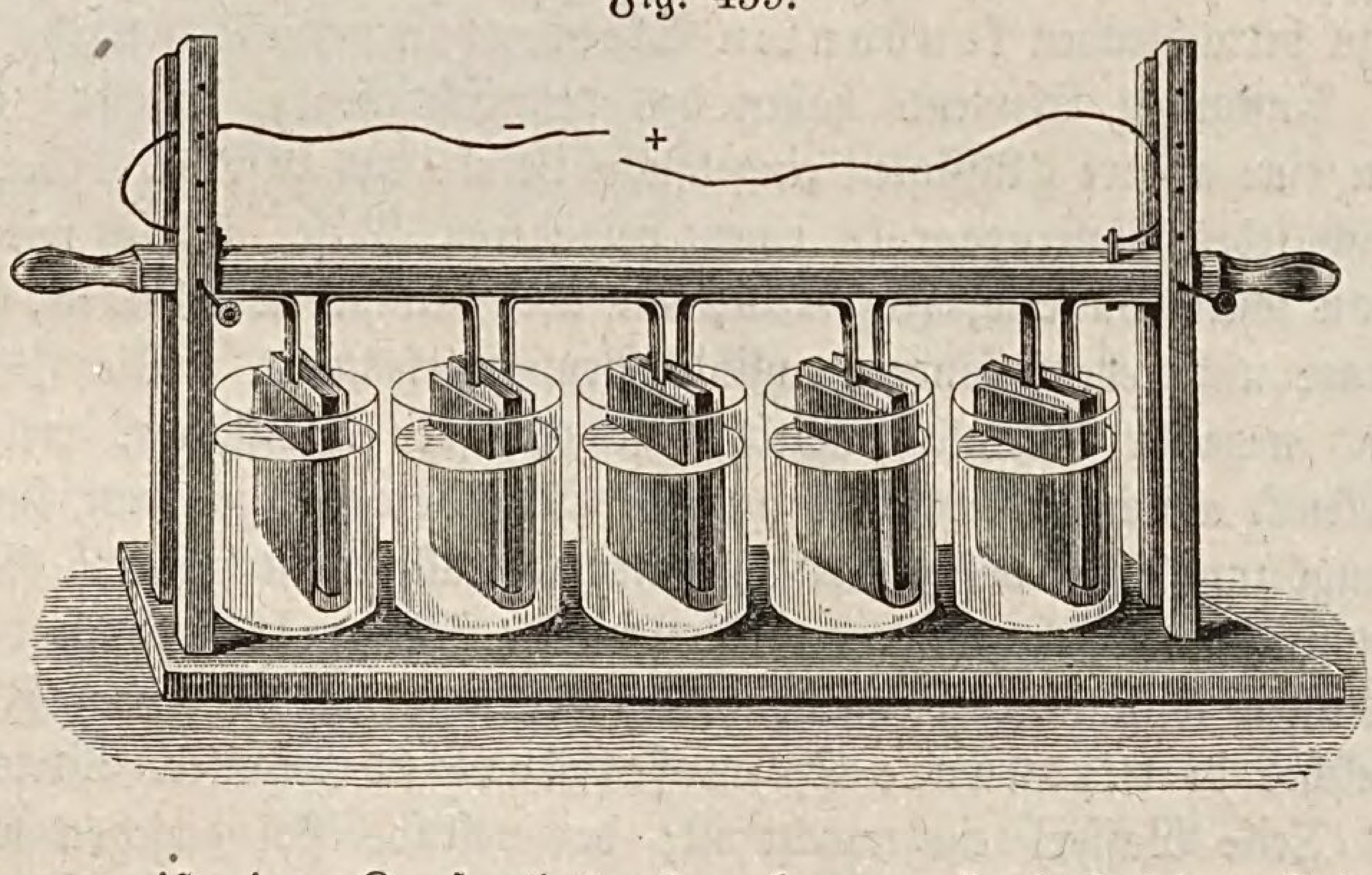
An die Stelle der ursprünglichen Säule trat zunächst der Trogapparat, Fig. 437, welcher längere Zeit im Gebrauche war. Die einzelnen Elemente bestehen aus rechtwinkligen Platten von Kupfer und Zink, welche auf einander gelötet sind. Diese Plattenpaare sind nun einander parallel in einen Kasten von Holz, *bb'*, dessen Wände inwendig mit einer nichtleitenden Harzschicht überzogen sind, so eingelassen, daß der Zwischenraum zwischen je zwei Plattenpaaren eine Zelle oder einen Trog bildet, der mit angesäuertem Wasser gefüllt wird. Diese Wasserschicht, welche ungefähr 3 Linien dick ist, vertritt hier die Stelle der feuchten Scheibe.

Fig. 438.



Weit bequemer für den Gebrauch ist die Wollaston'sche Batterie, von welcher Fig. 438 ein Plattenpaar darstellt. Die Zinkplatte *z* ist nach oben durch einen Streifen verlängert, an den bei *s* ein Streifen *a* von Kupferblech angelötet ist, welcher zur Kupferplatte des folgenden Plattenpaares führt. Um die Zink-

Fig. 439.



platte herum ist eine Kupferplatte *k* gebogen, so daß jeder Seite von *z* eine Kupferfläche gegenübersteht, deren metallische Berührung mit der Zinkplatte am zweckmäßigsten durch vier Holzklötzchen *h* verhindert wird. —

Von der Kupferplatte *k* führt ein Kupferstreifen *b* zur Zinkplatte des vorhergehenden Plattenpaares.

Eine Reihe solcher Plattenpaare ist nun mittels ihrer Verbindungsstreifen an einer Holzleiste befestigt, so daß man alle auf einmal niederlassen und in die Flüssigkeit eintauchen kann. Jedes Plattenpaar hat sein besonderes Gefäß, wie man Fig. 439 (a. v. S.) sieht.

Wenn die Gefäße rund sind, wie unsere Figur zeigt, so müssen die Plattenpaare ziemlich weit aus einander stehen. Viel Raum wird dadurch gewonnen, daß man flache Gefäße von Glas oder Porzellan anwendet oder noch besser einen Trog von der Form wie der in Fig. 437 abgebildete, in welchem die Scheidewände der Zellen gleichfalls aus der isolierenden Substanz des ganzen Gefäßes bestehen. Jede Zelle ist zur Aufnahme eines Plattenpaares bestimmt. Am besten sind solche Tröge von Porzellan, doch reicht auch gute Töpferware hin, wenn sie mit einer dauerhaften Glasur versehen ist.

Faraday brachte für diese Batterie einen Trog ohne alle Scheidewand in Anwendung; obgleich nun dabei ein Teil der galvanischen Kraft durch Nebenschließung verloren geht, so gewinnt man doch wieder dadurch, daß man die Plattenpaare näher zusammenbringen kann, und es bleibt dann immer noch eine bedeutende Wirkung übrig.

215 **Die konstanten Elemente.** Bei allen den bis jetzt besprochenen einfachen und zusammengesetzten Säulen ist die Wirkung gleich nach dem Eintauchen in die saure Flüssigkeit sehr energisch; sie nimmt aber sehr rasch ab. Diese Veränderlichkeit des Stromes ist bei der Vornahme von Versuchen sehr störend, insbesondere dann, wenn es sich darum handelt, vergleichende Messungen über die Stromkraft auszuführen. Daß die Stromstärke so rasch abnimmt, wenn beide Metalle in verdünnte Schwefelsäure eingetaucht sind, rührt von der später noch zu besprechenden galvanischen Polarisation her, welche bei den nun zu betrachtenden konstanten Elementen vermieden wird.

Die konstanten Elemente haben das gemeinschaftlich, daß das negative Metall in eine andere Flüssigkeit eingetaucht ist als das positive. Gewöhnlich befindet sich jedes Plattenpaar in einem besonderen Glase, ähnlich wie bei der Wollaston'schen Batterie, Fig. 439; um aber Raum zu ersparen, sind die Plattenpaare nicht eben, sondern cylinderförmig gekrümmt. Die Flüssigkeit, welche das negative Metall umgiebt, ist von der Flüssigkeit, welche das positive Metall umgiebt, durch eine poröse Scheidewand getrennt, für welche man anfangs zum Teil tierische Blasen, später aber allgemein hohle poröse Thoncylinder anwandte, welche unter dem Namen der Thonzellen bekannt sind.

Bei allen konstanten Elementen wird der negative Pol durch Zink gebildet, welches in verdünnte Schwefelsäure (1 Maßteil Vitriolöl auf 8 bis 12 Teile Wasser) eingetaucht ist; der positive Pol dagegen wird bei dem Becquerel'schen oder Daniell'schen Elemente durch Kupfer gebildet, welches in eine konzentrierte Lösung von Kupfervitriol, bei dem Grove'schen durch Platin, welches in konzentrierte Salpetersäure

eingetaucht ist. Bei dem Bunsen'schen Elemente ist das Platin durch sehr dichte Kohle, wie sie sich in den Retorten der Gasfabriken bildet, ersetzt.

Fig. 440 stellt ein Daniell'sches Element dar. Das mit einer Lösung von Kupfervitriol gefüllte Glasgefäß enthält zunächst einen aus Kupferblech gebogenen hohlen Cylinder *K*, in welchem die mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Thonzelle *T* steht. In die Flüssigkeit der Thonzelle ist dann der Zinkcylinder *Z* eingetaucht.

An dem Zinkcylinder ist ein geschlitzter Metallstreifen *m*, am Kupfercylinder ein Streifen *p* von Kupferblech befestigt, welcher die Schraube *s* trägt, vermittelst deren man den Kupferstreifen *p* mit dem Streifen *m* des nächsten Elements zusammenschrauben kann.

Fig. 440.

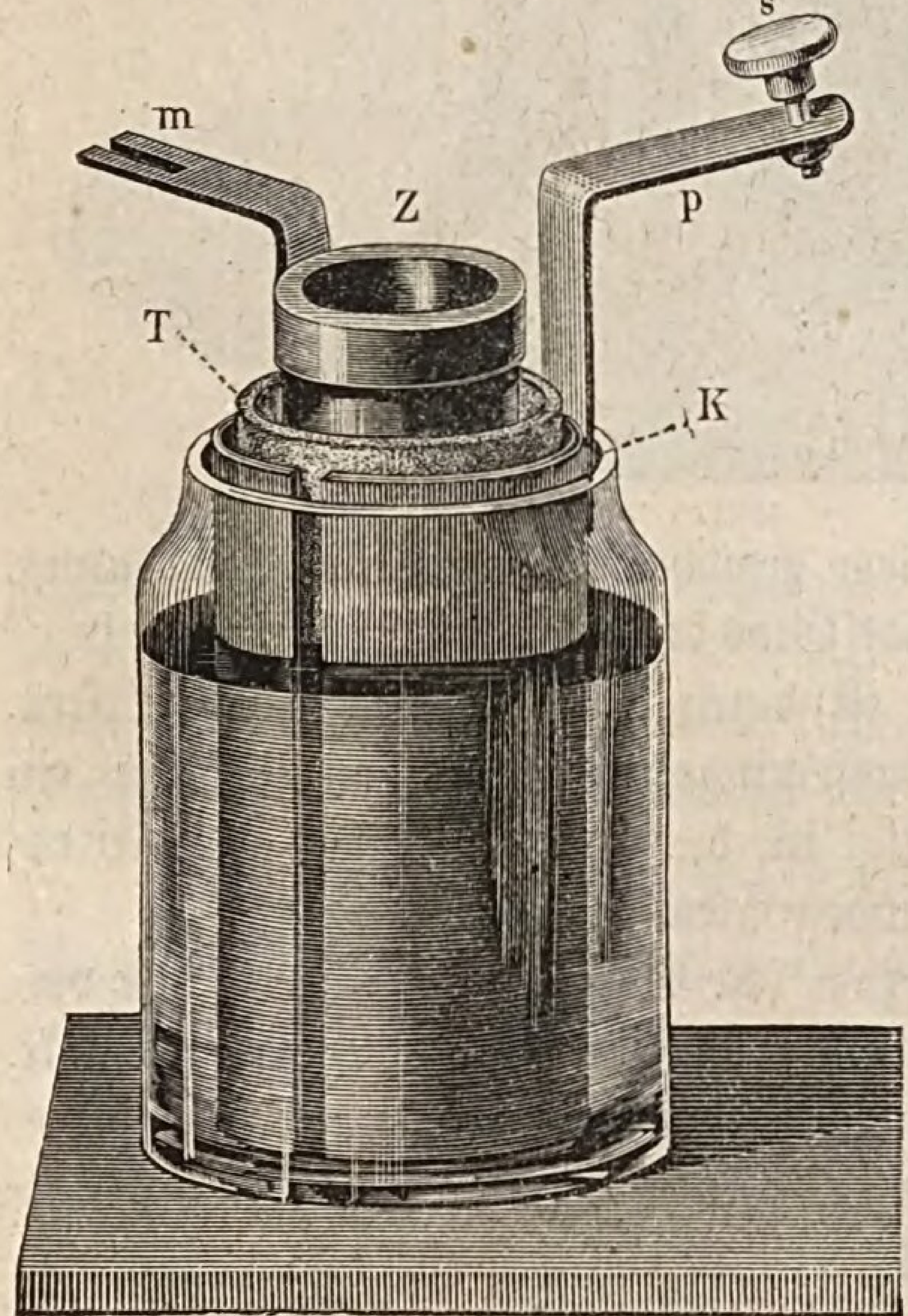
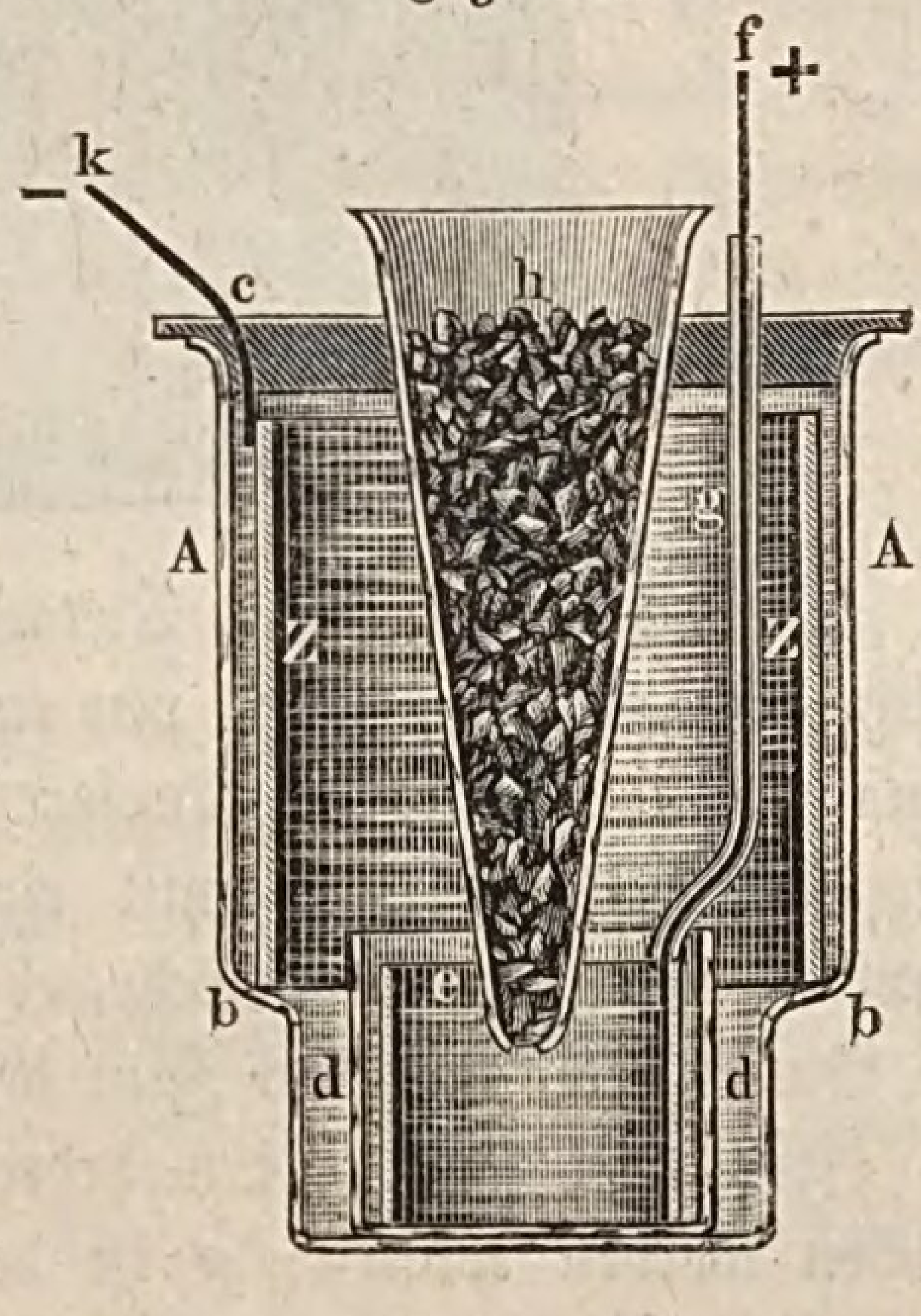


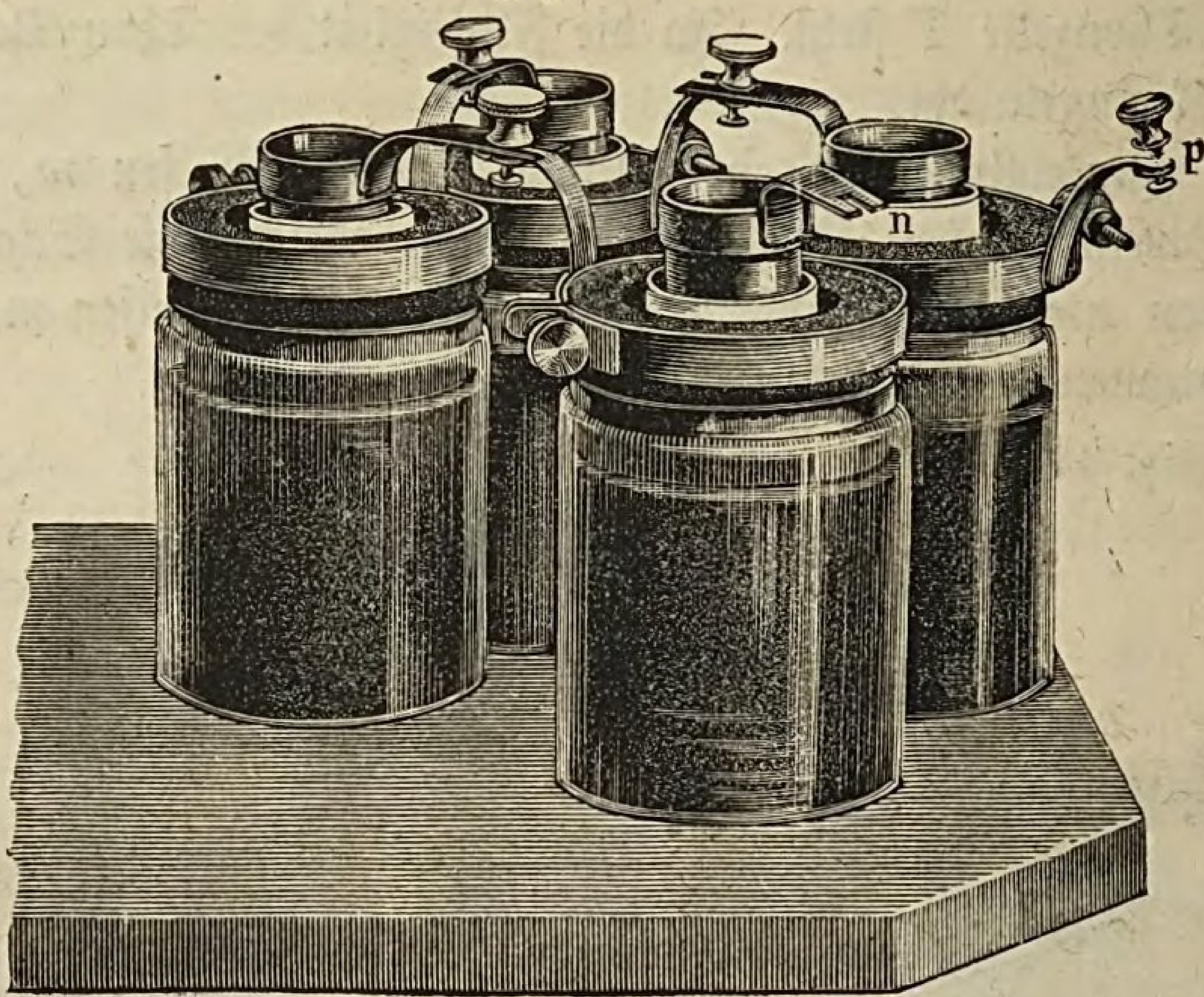
Fig. 441.



Wenn ein Daniell'sches Element der eben beschriebenen Art längere Zeit in Thätigkeit bleibt, so setzt sich an der Thonzelle metallisches Kupfer in Form kleiner Wärzchen an, welche die Poren derselben mehr und mehr verstopfen. Diesen Übelstand hat Meidinger dadurch beseitigt, daß er die poröse Scheidewand ganz vermieden hat. In ein unten sich verengendes Glasgefäß *A*, Fig. 441, ist der Zinkring *Z* eingesetzt, während sich der Kupferring *e* in einem Glasgefäße *d* befindet, welches auf dem Boden von *A* steht. Der Zuleitungsdraht von *e* ist von einer isolierenden Guttaperchahülle oder von einer Glasröhre umgeben. Das Gefäß *A* ist mit einer Lösung von Bittersalz gefüllt, welche das Zink umspült, und in derselben hängt vom Deckel des Gefäßes getragen, ein Glastrichter (oder Glasballon) *h* herab, welcher mit Stücken von Kupfervitriol gefüllt ist und dessen nach unten gerichtete Öffnung mit einem Korke verschlossen

ist, in dessen Umfang einige Rinnen eingeschnitten sind. Wegen ihres größeren specifischen Gewichtes diffundiert die Lösung des Kupfervitriols nur äußerst langsam in der Bittersalzlösung. Solche Elemente können ein Jahr lang in Thätigkeit sein, ohne einer Nachfüllung zu bedürfen.

Fig. 442.



Die Bunsen'schen Elemente haben gewöhnlich die gleiche Anordnung, welche Fig. 440 erläutert, nur enthält das Glas konzentrierte Salpetersäure, und der hohle Kupfercylinder ist durch einen Kohlencylinder ersetzt. Der Kohlencylinder ist mit einem Kupferringe umgeben, an welchem ein Kupferstreifen mit einer Schraube befestigt ist, die zur Herstellung einer leitenden Verbindung mit dem Zink des folgenden Elementes dient.

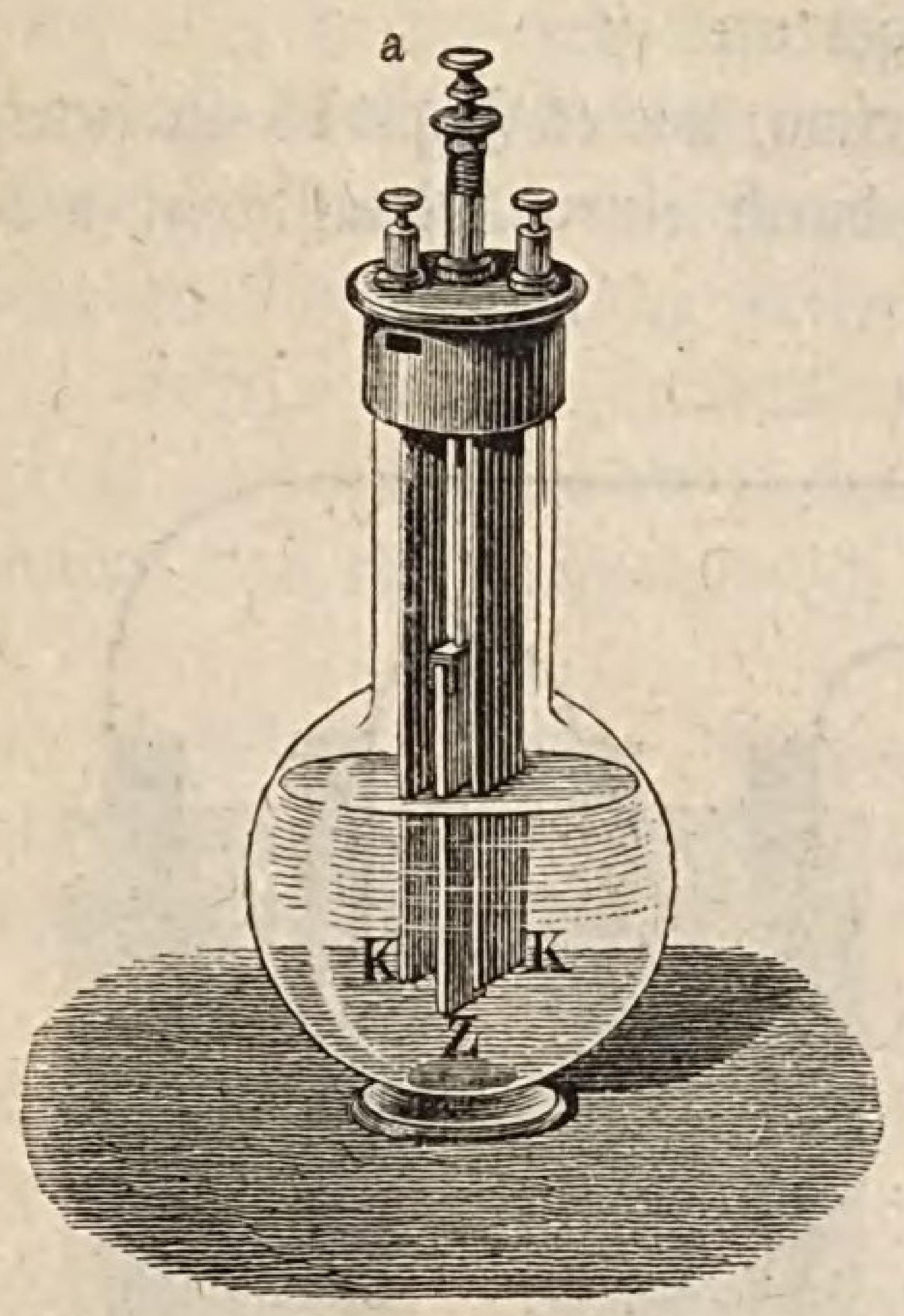
Fig. 442 zeigt, wie mehrere Bunsen'sche Elemente zu einer Säule verbunden werden können; *p* ist der positive, *n* ist der negative Pol der Säule.

Beim Gebrauche der Grove'schen und der Bunsen'schen Elemente entwickeln sich aus der Salpetersäure äußerst stechende Dämpfe von Untersalpetersäure; man hat deshalb versucht, die Salpetersäure durch andere sauerstoffreiche Flüssigkeiten, z. B. eine Lösung von Chromsäure, zu ersetzen. Eine sehr wirksame Flüssigkeit stellte Bunsen dar, indem er 92 g pulverisierten sauren chromsauren Kalis mit 93,5 ccm konzentrierter Schwefelsäure, das Pulver nach und nach zusetzend, zusammenrieb, bis ein gleichförmiger Brei von Chromsäure und saurem schwefelsaurem Kali entstanden war, welchem dann unter stetem Umrühren 900 ccm Wasser zugesetzt wurden, bis alles gelöst war. Wenn diese anfangs schön gelbrote Flüssigkeit den Strom einige Zeit lang geleitet hat, so färbt sie sich dunkel, und zwar infolge der Bildung von Chromalaun.

Da diese Flüssigkeit das Zink nicht stärker angreift als verdünnte Schwefelsäure, so wird hier die Anwendung der porösen Scheidewand ganz überflüssig; man kann also Kohle und Zink in dieselbe Flüssigkeit eintauchen. — Das Chromsäure-Element hat gewöhnlich die Form einer Flasche

(Fig. 443) mit weitem Halse, welcher durch einen abnehmbaren Holzdeckel verschlossen ist. In diesem Deckel sind zwei unter sich verbundene Kohlenplatten *K* befestigt, die beständig in die Flüssigkeit eintauchen, während die Zinkplatte an einem in dem Holzdeckel verschiebbaren Messingstabe befestigt ist und bei dem Gebrauch des Elementes in die Flüssigkeit hinabgelassen, nachher aber wieder heraufgezogen wird. Der mit dem Zink verbundene Pol ist, wie immer, der negative, der mit der Kohle verbundene der positive des Elementes.

Fig. 443.

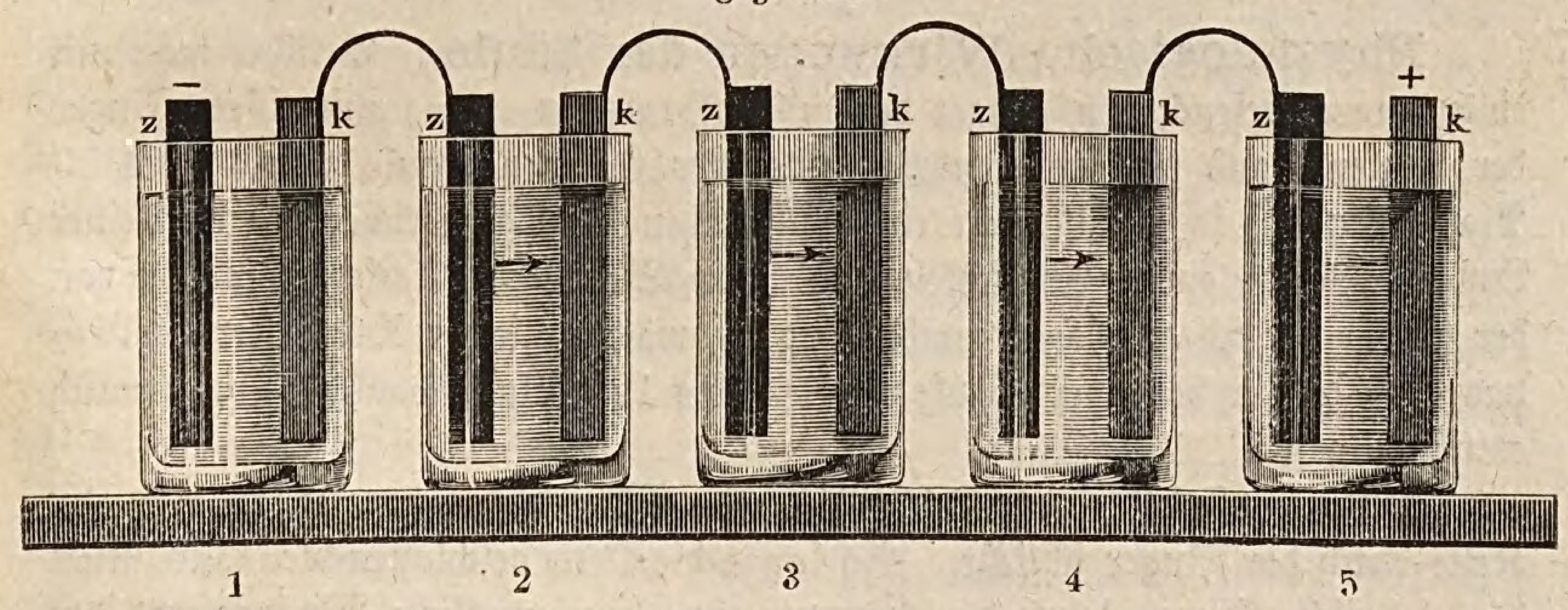


Dieses Element giebt bei frischer Füllung einen starken, nahezu unveränderlichen Strom; derselbe nimmt jedoch infolge der Polarisation rasch ab, sobald die Flüssigkeit nach längerem Gebrauch eine dunkle Färbung angenommen hat. Wegen der leichten Handhabung eignet sich dieses Element vorzugsweise zur Ausführung galvanischer Versuche.

Für schwache Ströme, wie sie z. B. bei der elektrischen Telegraphie gebraucht werden, wendet man außer dem Meidinger'schen Elemente auch noch vielfach Zink-Kohlenelemente an, bei welchen beide Platten in einer Lösung von Kochsalz oder Alaun stehen; bei genügender Größe können solche Elemente über ein Jahr gebraucht werden, ohne einer Nachfüllung zu bedürfen.

Bestimmung der Pole und der Stromesrichtung einer Bechersäule. Wenn man eine galvanische Batterie aus einzelnen elektromotorischen Bechern zusammensetzt, wie dies Fig. 444 schematisch darstellt, so 216

Fig. 444.

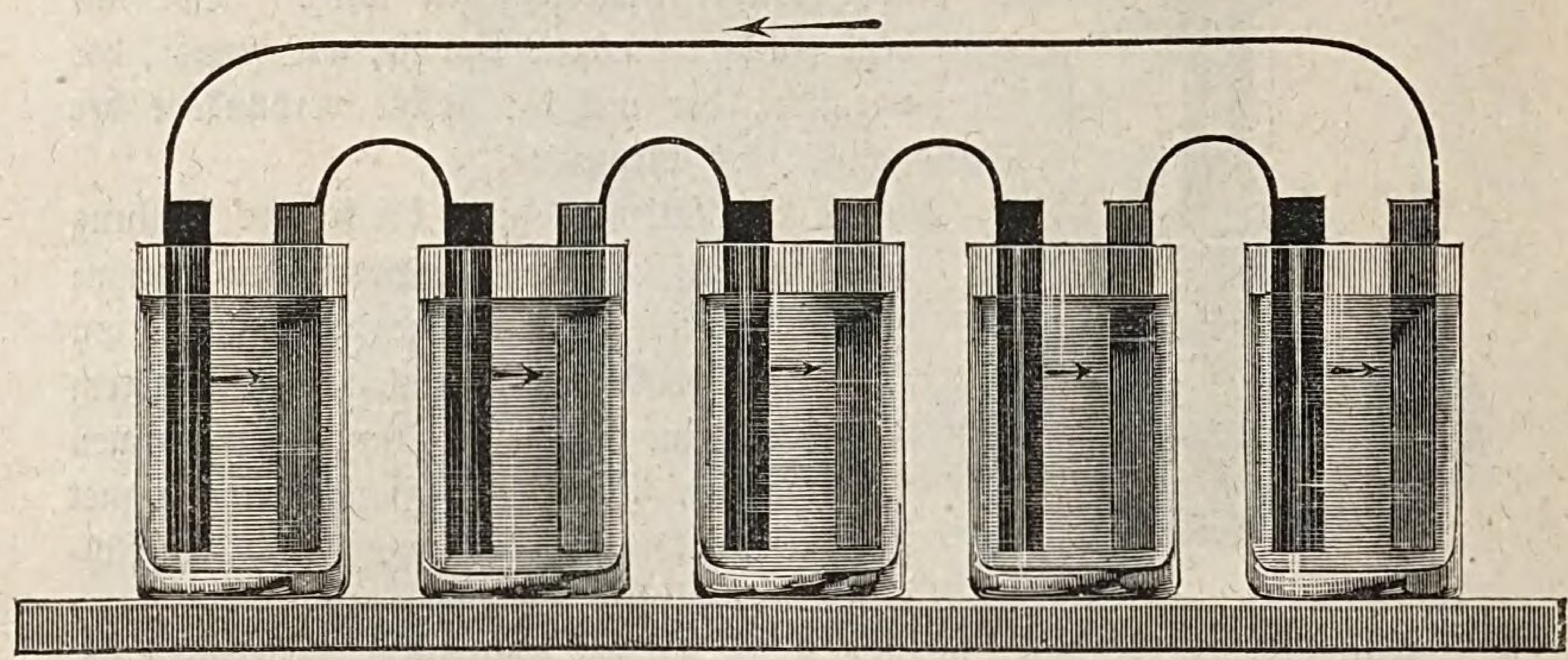


muß immer die Kupferplatte des einen Bechers mit der Zinkplatte des folgenden in leitende Verbindung gebracht werden; auf diese Weise aber bleibt in dem ersten Becher eine vereinzelte Zinkplatte, in dem letzten eine vereinzelte Kupferplatte übrig.

Nach §. 212 ist nun klar, daß die vereinzelt bleibende Zinkplatte des ersten Bechers den negativen, die vereinzelt bleibende Kupferplatte (oder die an ihre Stelle tretende Platin- oder Kohlenplatte) des letzten Bechers aber den positiven Pol der Säule bildet, wie auch in Fig. 444 angedeutet ist.

Wird nun die Kette geschlossen, indem man etwa, wie es Fig. 445 andeutet, die Kupferplatte in 5 mit der Zinkplatte in 1 durch einen Metalldraht ver-

Fig. 445.



bindet, so muß der positive Strom in der Richtung cirkulieren, wie es die Pfeile andeuten, er tritt also von der in den Becher 5 eingetauchten Kupferplatte in den Schließungsbogen ein.

In jedem einzelnen Becher geht der positive Strom stets von der Zinkplatte durch die Flüssigkeit zu der gegenüberstehenden Kupfer-, Platin- oder Kohlenplatte, wie dies in unserer Figur gleichfalls durch kleine Pfeile angedeutet ist.

217 **Physiologische Wirkungen der Säule.** Berührt man mit einem etwas befeuchteten Finger der linken Hand den einen, mit einem Finger der rechten Hand den anderen Pol einer Volta'schen Säule von 40 bis 50 Plattenpaaren, so erhält man einen schwachen Schlag, welcher mit dem einer Leydner Flasche einige Ähnlichkeit hat. Die Stärke des Schlages, welche von der Größe der Plattenpaare unabhängig ist, wächst mit der Anzahl der Plattenpaare, so daß er bei einer Säule von 100 bis 120 Plattenpaaren schon ziemlich empfindlich ist.

Man empfindet einen Schlag in dem Momente, in welchem man die Kette durch die Finger schließt. So lange die Kette geschlossen bleibt, cirkuliert der elektrische Strom durch den Körper, ohne eine merkliche Wirkung auf das Gefühl hervorzubringen; nur bei kräftigen Säulen von vielen Plattenpaaren empfindet man während des Geschlossenseins ein prickelndes Gefühl an den Stellen, wo der Strom in den Körper eingeführt wird. Einen zweiten Schlag empfindet man aber in dem Augenblicke, in welchem man die Kette wieder öffnet.

Schon durch ein einfaches Plattenpaar läßt sich eine blitzähnliche Erscheinung in den Augen hervorbringen. Man kann den Versuch auf mannigfache Weise anstellen; man bringt z. B. eine Silberplatte an den Augapfel selbst oder an das zuvor gut angefeuchtete Augenlid und berührt sie darauf mit einem Zinkstücke, welches man in der wohl angefeuchteten Hand hält oder im Munde stecken hat. Leitet man den Strom einer Säule durch die Augen, so wird die Lichterscheinung stärker.

Legt man ein Zinkstück auf die Zunge, ein Silberstück unter dieselbe und bringt man hierdurch die vorderen Enden beider Metalle in Berührung, so empfindet man einen eigentümlich stechenden Geschmack.

Licht- und Wärmeerzeugung durch galvanische Ströme. 218 Die galvanischen Ströme bringen, wie die der Reibungselektricität, Wärme und Licht hervor.

Wenn man den galvanischen Strom durch einen Metalldraht leitet, so wird derselbe erwärmt. Bei hinlänglich gesteigerter Stromstärke kann der Draht erst rotglühend, dann weißglühend werden, endlich schmelzen und auseinander fallen, was sich am leichtesten an dünnen Eisendrähten zeigen läßt.

Bei gleicher Stromstärke wird ein Drahtstück um so stärker erwärmt, je größer sein Leitungswiderstand ist. Um einen Draht glühend zu machen, bedarf es also einer um so geringeren Stromstärke, je dünner er ist. Ebenso werden Drähte, welche aus schlecht leitenden Metallen gemacht sind, bei gleicher Dicke leichter ins Glühen kommen, als Drähte gut leitender Metalle. Eisen und Platindrähte glühen leichter als Kupfer- und Silberdrähte, weil, wie wir sehen werden, die beiden erstgenannten Metalle schlechtere Leiter der Elektricität sind als die beiden zuletzt genannten.

Das galvanische Glühen der Metalldrähte hat man mit Erfolg zum Anzünden von Minen benutzt.

Befestigt man an die beiden Pole einer galvanischen Kette zugespitzte Kohlenstücke, am besten von derselben Masse, aus welcher die Kohlencylinder der Bunsen'schen Batterie gemacht sind, so wird man, sobald sich diese Spitzen berühren, zwischen ihnen ein ungemein glänzendes Licht wahrnehmen. Dies helle Licht läßt sich schon mit einer Bunsen'schen Säule von 6 bis 10 Bechern zeigen; da, wo sich die Kohlenspitzen berühren, erscheint ein kleiner, sehr hell leuchtender Stern. Wenn man die Zahl der Becher vermehrt, so nimmt der Glanz der Erscheinung außerordentlich zu; mit einer Säule von 40 bis 50 Bunsen'schen Bechern erhält man ein Licht, welches das Drumond'sche Kalklicht weit übertrifft. Bei Anwendung so vieler Paare, kann man auch die Kohlenspitzen, wenn einmal der Strom übergeht, etwas von einander entfernen, und so erhält man durch die glühenden Kohlenteilchen, welche von einem Pole zum anderen übergehen, das herrliche Phänomen eines Lichtbogens. Dieser Bogen selbst ist nur lichtschwach, ein blendendes Licht aber entwickelt sich an den beiden Punkten, in welchen es auf den Kohlenspitzen aufsitzt. Man hat dieses Licht zur Beleuchtung im großen angewendet, z. B. auf Leuchttürmen;

auch hat man mit Erfolg das Kalklicht der sogenannten Knallgasmikroskope durch das elektrische Kohlenlicht ersetzt.

219 **Chemische Wirkungen der Säule.** Die chemischen Wirkungen der Säule wurden von Carlisle und Nicholson entdeckt, welche im Jahre 1800 die Zerlegung des Wassers durch den galvanischen Strom beobachteten. Wenn zwei Platinplatten, von denen die eine mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pol der Säule in Verbindung steht, ohne sich zu berühren in ein Gefäß mit angesäuertem Wasser eingetaucht werden, so findet an ihnen eine lebhafte Gasentwickelung statt.

Das von der positiven Polplatte aufsteigende Gas ist Sauerstoff-, das von der negativen aufsteigende ist Wasserstoffgas.

Fig. 446.

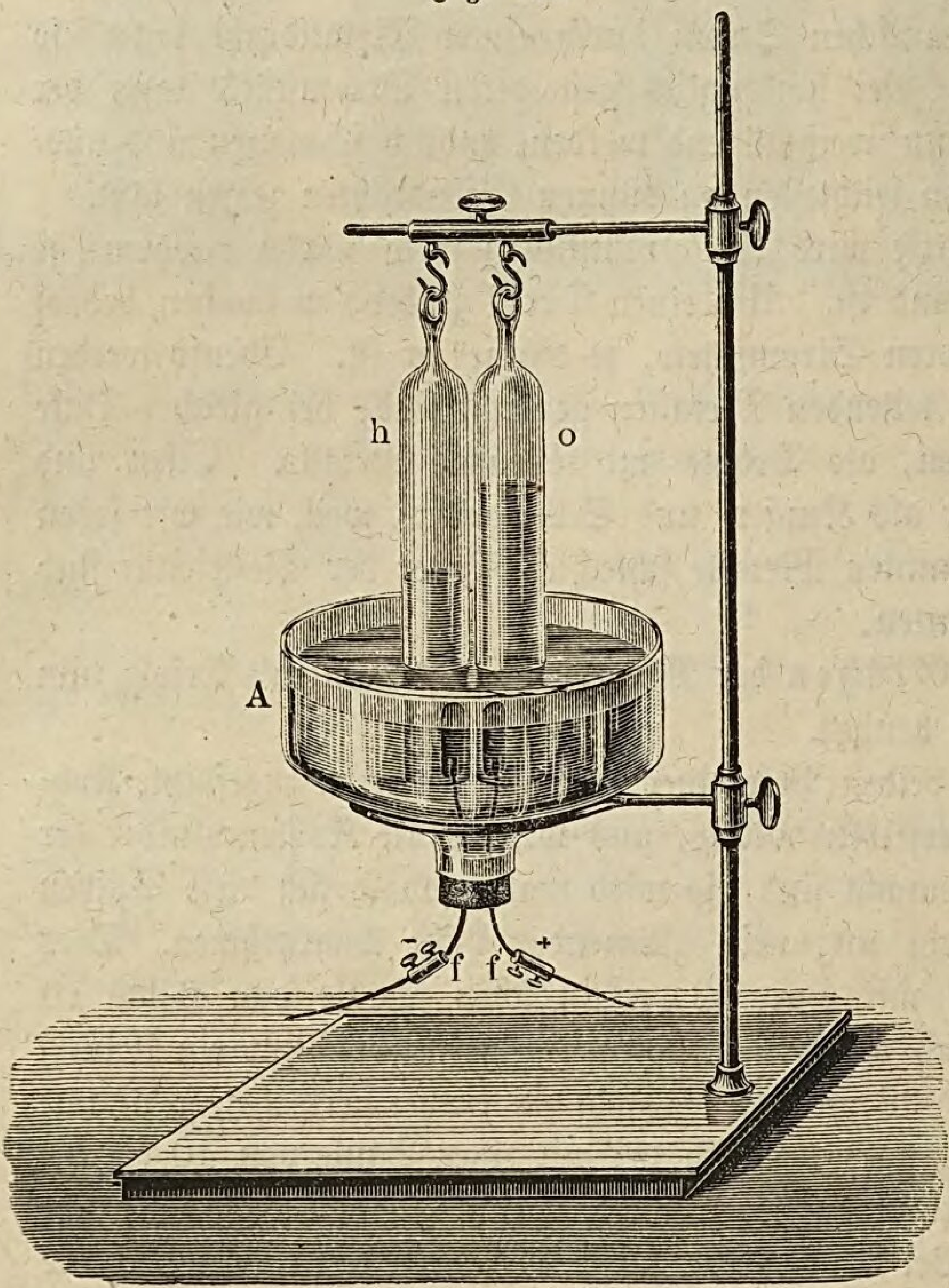
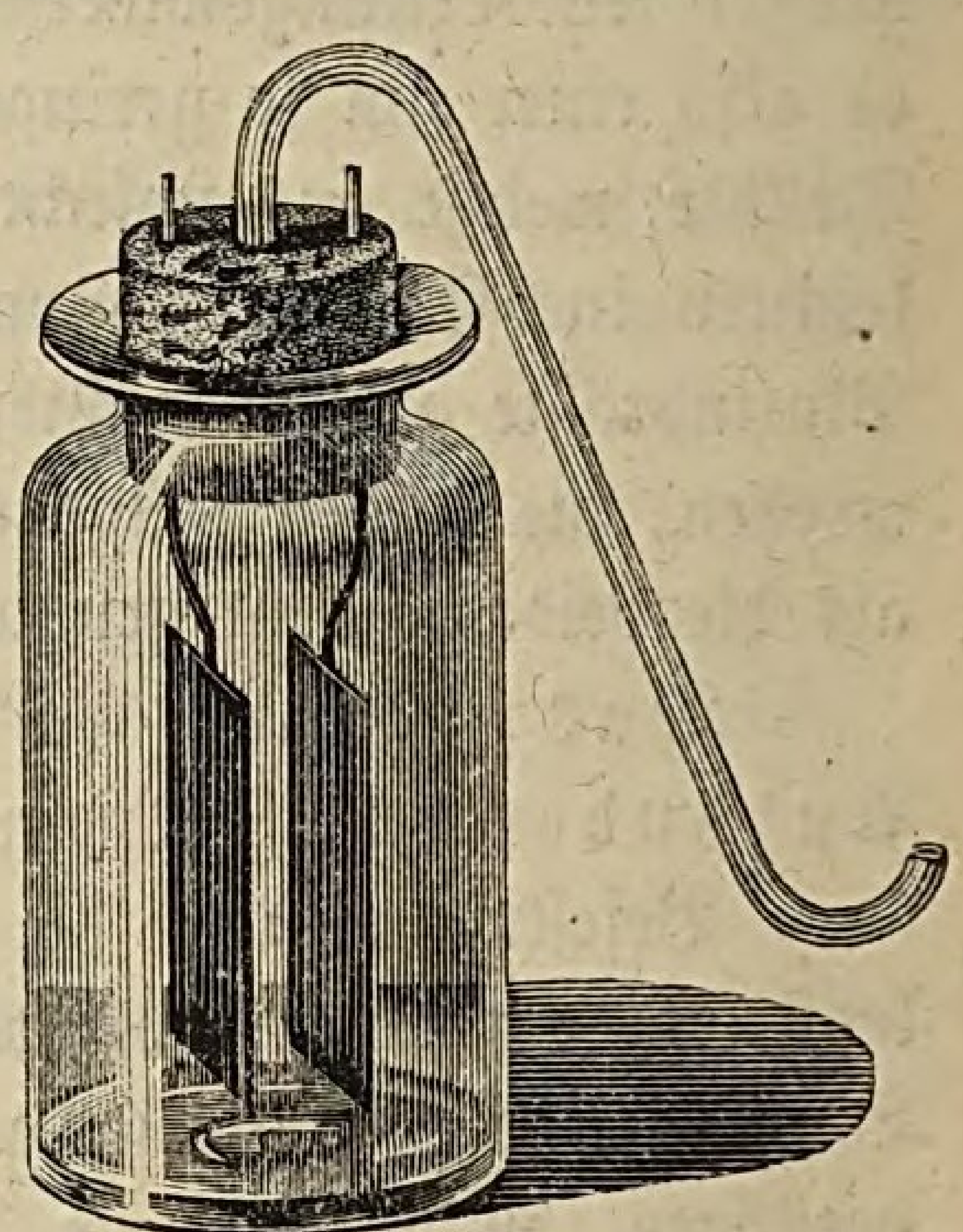


Fig. 447.



Das Volum des am negativen Pol entwickelten Wasserstoffgases ist doppelt so groß, als das Volum des gleichzeitig am positiven Pol entwickelten Sauerstoffs.

Ein passender Apparat zur Wasserzersetzung ist in Fig. 446 dargestellt. Er besteht aus einem Glase, durch dessen isolierenden Boden zwei Kupferdrähte

hindurchgehen, welche sich jedoch nicht berühren dürfen. An diese Drähte sind Platinplatten angelötet, die Lötstelle aber und der Kupferdraht, soweit er sich im Gefäße befindet, ist sorgfältig mit Siegellacklösung überzogen. Zwei Glasglöckchen *o* und *h*, welche mit angesäuertem Wasser gefüllt sind, hängen in das gleichfalls mit angesäuertem Wasser gefüllte Glasgefäß herab, so daß sich über jeder der beiden Polplatten ein solches Glöckchen befindet. Sobald man nun die Drähte *f* und *f'* mit den Polen einer Säule in Verbindung bringt, entwickeln sich Gasblasen in reichlichem Maße. Das Sauerstoffgas steigt immer in dem Glöckchen über dem positiven Pole, das Wasserstoffgas in dem über dem negativen Pole auf.

Eine Säule von 4 bis 6 Bunsen'schen Elementen bringt schon eine sehr lebhafte Wasserzersetzung hervor.

Das destillierte und vollkommen reine Wasser wird auf diese Weise nicht zersetzt, weil dasselbe den Strom nicht genügend leitet; sobald man aber nur einige Tropfen irgend einer Säure zugießt, wird das Leitungsvermögen des Wassers so sehr erhöht, daß eine lebhafte Gasbildung erfolgt und man in kurzer Zeit eine ziemlich bedeutende Menge der Gase auffangen kann. Wie die Menge der gebildeten Gase von der Stromstärke abhängt, werden wir später sehen.

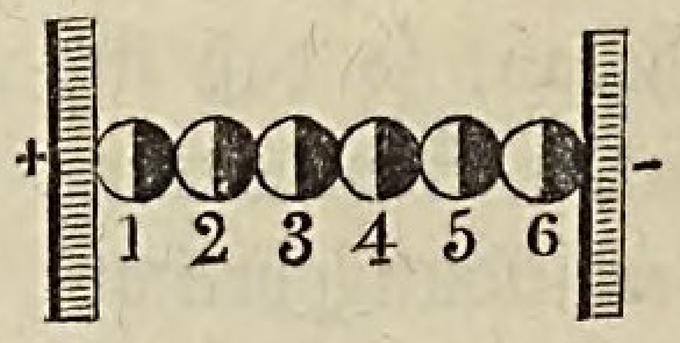
Wenn es nicht darauf ankommt, die beiden Gasarten getrennt aufzufangen, kann man sich des Apparats Fig. 447 bedienen, in welchem noch mehr Wasser zersetzt wird, weil zwei größere Polplatten von Platinplatten sich viel näher stehen; das Gemenge der beiden Gase entweicht durch eine gebogene Röhre. Läßt man diese Röhre unter Seifenwasser münden, so sammelt sich das aufsteigende Gasgemisch darauf in Blasen an, welche bei der Berührung mit einem brennenden Spahn sehr heftig explodieren, weshalb das Gasgemisch auch Knallgas genannt wird.

Ein Wasserzersetzungsapparat, der mit einer graduierten Glasröhre verbunden ist, in welcher man das gebildete Knallgas auffangen und messen kann, führt den Namen Voltameter, weil die Menge des in einer bestimmten Zeit durch den Strom gebildeten Knallgases ein Maß für die Stärke des Volta'schen Stromes ist.

Grotthuß hat (1805) diese merkwürdige Erscheinung folgendermaßen erklärt. Wenn Wasserstoffgas mit Sauerstoffgas sich zu Wasser verbindet, so werden bei der innigen Berührung der kleinsten Teilchen die Sauerstoffatome negativ, die Wasserstoffatome aber positiv elektrisch; wegen der gleichförmigen Verteilung der Teilchen beider Substanzen aber zeigt jedoch die Verbindung keine freie Elektricität. Wenn sich aber Wasser zwischen den beiden Polen einer galvanischen Säule befindet, so wird der positive Pol auf die zunächst liegenden Wasserteilchen in der Weise wirken, daß die negativen Stoffatome angezogen und dem positiven Pole zugekehrt werden, während die positiven Wasserstoffatome abgestoßen werden und sich dem negativen Pole zuwenden, etwa so, wie Fig. 448 (a. f. S.) versinnlicht, wo die Kreischen Wassermoleküle darstellen und zwar die weiße Hälfte derselben das Sauerstoffatom, die schwarze dagegen die beiden Wasserstoffatome. Wenn nun die Anziehung, welche der positive Pol

auf das Sauerstoffatom des Wassermoleküls 1 ausübt, groß genug ist, so wird es seinen beiden Wasserstoffatomen entrissen; diese Wasserstoffatome verbinden sich aber mit dem Sauerstoffatom des Wassermoleküls 2, der Wasserstoff von 2 mit dem Sauerstoff von 3 u. s. w. Auf diese Weise geht auf der ganzen Strecke zwischen beiden Polen eine beständige Zersetzung und Wiederbildung von Wasser vor sich, während an den Polen selbst die Bestandteile desselben frei werden.

Fig. 448.



Einen jeden Körper, welcher durch den galvanischen Strom in seine chemischen Bestandteile zerlegt wird, nennt man nach Faraday einen Elektrolyt; die durch den galvanischen Strom hervorgebrachte Zersetzung wird als Elektrolyse bezeichnet.

Die Polplatten, zwischen welchen die elektrolytische Zersetzung stattfindet, nennt Faraday Elektroden.

Nach der oben entwickelten Theorie der galvanischen Wasserzersetzung ist das Wasser zwischen den Polplatten der Zersetzungsstelle gewissermaßen polarisiert, d. h. alle Sauerstoffatome sind gegen die positive, alle Wasserstoffatome sind gegen die negative Elektrode hin gekehrt. Die positive Elektrode muß also auf den Sauerstoff, die negative muß auf den Wasserstoff anziehend wirken; wir müssen also die Sauerstoffatome als elektronegativ, die Wasserstoffatome als elektropositiv annehmen.

Die Wasserzersetzung geht aber nicht allein zwischen den Polplatten des Voltameters, sondern in gleicher Weise auch zwischen den Plattenpaaren der stromerzeugenden Säule vor sich; der positive Strom geht vom Zink durch die Flüssigkeit zum Kupfer (oder Platin) wie Fig. 444 Seite 411 andeutet. An der Kupfer- (Platin-) platte wird Wasserstoffgas ausgeschieden, während der an der Zinkplatte auftretende Sauerstoff das Zink oxydiert.

Hier stoßen wir für den ersten Anblick auf einen Widerspruch. Der negativ elektrische Sauerstoff geht zur Zinkplatte, welche doch, wie wir in §. 210 gesehen haben, in Berührung mit angesäuertem Wasser selbst negativ elektrisch wird.

Um diesen Widerspruch zu lösen, müssen wir annehmen, daß eine Metallplatte, welche in eine elektromotorische Flüssigkeit eingetaucht ist, in ähnlicher Weise polarisiert wird, wie die Flüssigkeit selbst. Wenn also eine Zinkplatte in angesäuertes Wasser eingetaucht wird, so wird der Teil ihrer Oberfläche positiv elektrisch, welcher von der Flüssigkeit berührt ist, während der aus der Flüssigkeit hervorragende Teil der Zinkoberfläche die negativ elektrische Ladung zeigt, welche in §. 210 besprochen wurde.

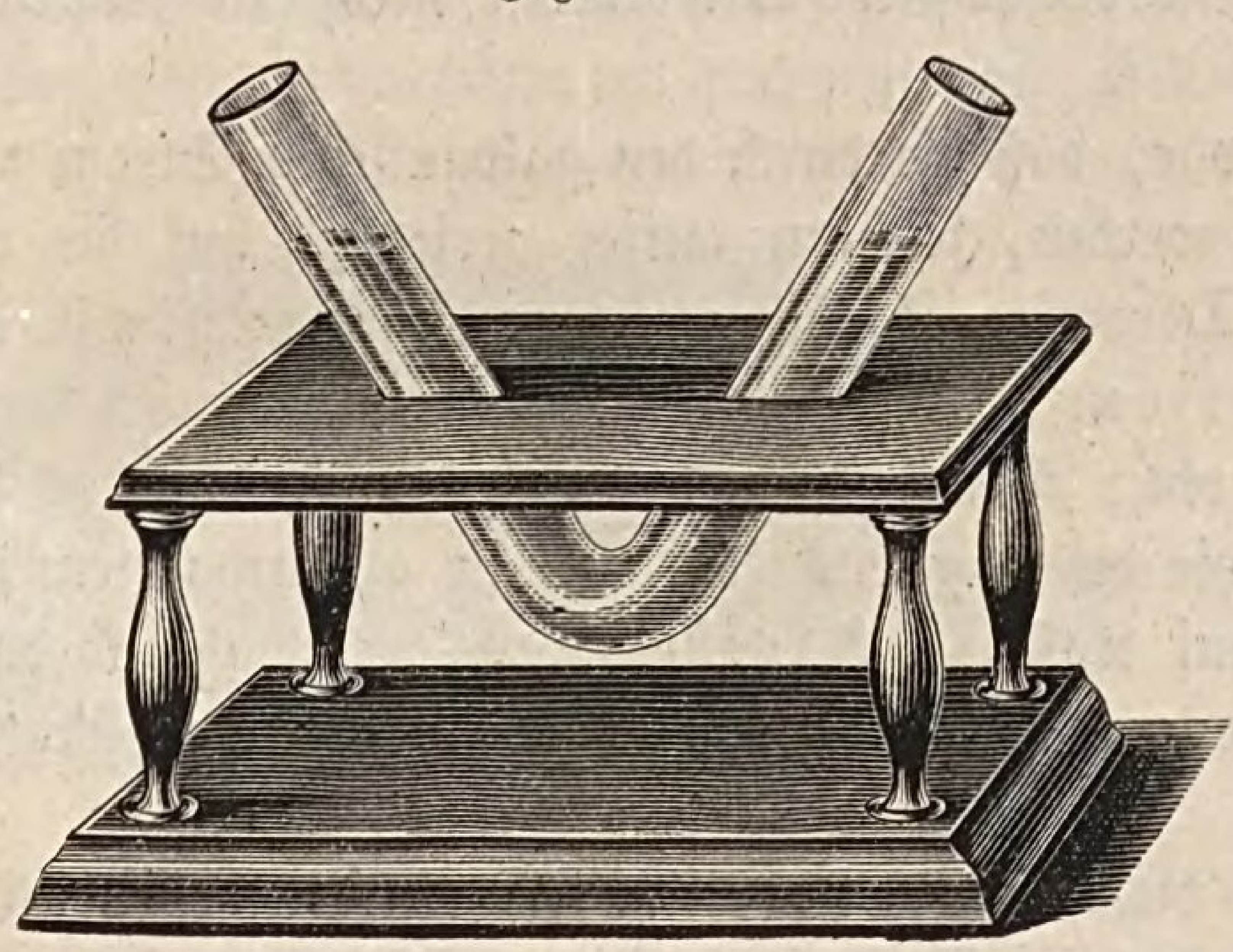
220 **Elektrolyse der Alkalien und der Erden.** Eine neue Epoche der Wissenschaft begann, als Humphrey Davy im Jahre 1807 mit Hülfe der Säule die Entdeckung machte, daß die Alkalien und die Erden, welche man bis dahin für einfache Körper gehalten hatte, zerlegbar seien. Diese Körper wurden dadurch in die Klasse der Oxyde zurückgeführt und die Chemie

mit mehreren neuen Metallen, dem Kalium, Natrium, Calcium, Aluminium u. s. w. bereichert. Berührt man nämlich ein angefeuchtetes Stück Ätzkali, welches auf einer mit dem positiven Pole einer kräftigen Säule verbundenen Platinplatte liegt, mit dem negativen Pole der Säule, so sieht man zahlreiche Metallkügelchen an diesem Pole erscheinen und unter Funkensprühen wieder verschwinden. Diese Kügelchen bestehen aus metallischem Kalium, welches bei der Zerlegung des Kalis frei wird. Seine Verwandtschaft zum Sauerstoffe ist aber so groß, daß es sich, mit der Luft in Berührung, sogleich wieder oxydiert; wenn es aber mit Wasser in Berührung kommt, so entzieht es diesem den Sauerstoff und entzündet das freiwerdende Wasserstoffgas, daher denn die Feuererscheinung. Man muß deshalb das Kalium in einer nicht sauerstoffhaltigen Flüssigkeit aufbewahren. Man gebraucht zu diesem Zwecke gewöhnlich Steinöl, welches aus Kohlenstoff und Wasserstoff zusammengesetzt ist.

Seebeck hat ein Mittel angegeben, um das durch die Säule ausgeschiedene Kalium sicherer zu sammeln. In ein Stück angefeuchteten kaustischen Kalis, welches zersetzt werden soll, wird eine Höhlung gemacht und Quecksilber in dieselbe gegossen. Das Kali wird dann auf ein mit dem positiven Pole der Säule in Verbindung stehendes Platinstück gelegt, das negative Drahtende aber in das Quecksilber getaucht. Alsbald geht die Zersetzung vor sich, Sauerstoff wird an der Platinplatte frei, das Kalium aber verbindet sich mit dem Quecksilber zu einem ziemlich beständigen Amalgam. Durch Destillation in einer Atmosphäre von Steinöldampf kann man alsdann das Quecksilber abscheiden und das Kalium in reinem Zustande erhalten.

Elektrolyse der Salze. Alle zusammengesetzten Körper, welche 221
sich im flüssigen Zustande befinden und den Strom leiten, sind Elektrolyte. Als solche kommen vorzugsweise die Lösungen der Salze in Betracht. Die Lösungen der Alkalisalze werden so zerlegt, daß die Säure nebst Sauerstoff am positiven, die Basis nebst Wasserstoff am negativen Pole erscheint. Die Zerlegung der Salze läßt sich dem Auge auf folgende Weise sehr gut sichtbar machen. Man fülle eine V-förmig gebogene Röhre, Fig. 449, mit einer Lösung von schwefelsaurem Natron oder Glaubersalz, die durch Lackmustinktur violett gefärbt ist. Taucht man nun auf der einen Seite die positive, auf der anderen die negative Polplatte in die Flüssigkeit, so wird am positiven Pole Sauerstoff und Schwefel-

Fig. 449.



säure ausgeschieden, welche das Lackmus rot färbt, am negativen aber Wasserstoff und Natron, welches das Lackmus blau färbt.

Gießt man von derselben Salzlösung in zwei neben einander stehende Gefäße, die durch ein feuchtes Asbestgewebe oder durch einen V-förmigen, mit der Flüssigkeit gefüllten Heber verbunden sind und taucht man dann in das eine Gefäß die positive, in das andere die negative Polplatte, so geht die Zersetzung ebenfalls vor sich, und nach einiger Zeit findet sich die Säure in dem Gefäße, in welches der positive Pol eingetaucht ist, die Basis im anderen, welches den negativen Pol enthält.

Die Salze der Schwermetalle werden meistenteils so zerlegt, daß sich das Metall auf der negativen Polplatte niederschlägt, ohne daß Wasserstoff frei wird, während an der positiven Polplatte wieder die Säure und Sauerstoff abgeschieden werden. Wird z. B. eine Lösung von schwefelsaurem Kupferoxyd oder Kupfervitriol der Elektrolyse unterworfen, so scheidet sich an der negativen Polplatte nur Kupfer ab, an der positiven dagegen Schwefelsäure und Sauerstoff.

Chlor-, Jod- und Brommetalle werden ebenfalls durch den elektrischen Strom zersetzt und zwar scheidet sich das Metall am negativen, Chlor, Jod und Brom am positiven Pole aus.

Wenn man wässerige Lösungen der Einwirkung des elektrischen Stromes unterwirft, so werden die Resultate der Zersetzung sehr häufig durch die Gegenwart des Wassers modificiert. Um die Mitwirkung des Wassers zu vermeiden, hat Faraday viele Körper durch Schmelzen in flüssigen Zustand versetzt und so der Einwirkung des Stromes unterworfen. So zerlegte er z. B. Chlorblei, Chlorsilber u. s. w., indem er sie auf eine Glasplatte legte, durch eine Weingeistlampe schmolz und alsdann die beiden Poldrähte in die flüssige Masse eintauchte. Wenn in das geschmolzene Chlorsilber Poldrähte von Silber eingetaucht werden, so wird am negativen Pole Silber ausgeschieden, welches sich an dem Drahte ansetzt, während der positive Silberdraht durch das freigewordene Chlor aufgelöst wird.

Sehr häufig kommt es vor, daß die durch den galvanischen Strom ausgeschiedenen Stoffe nicht frei werden, sondern weiter zersetzend auf die umgebende Flüssigkeit wirken. Derartige Zerlegungen bezeichnet man mit dem Namen der sekundären Aktion.

Hierher gehört z. B. die oben schon betrachtete Erscheinung, daß das Kalium, welches bei der Elektrolyse des angefeuchteten Ätzkalis am negativen Pole auftritt, sich sogleich wieder auf Kosten des Wassers oxydiert, während dafür Wasserstoff frei wird. Als weitere Beispiele sekundärer Aktion führen wir folgende an:

Der Sauerstoff, welcher durch den galvanischen Strom an der positiven Polplatte ausgeschieden wird, hat im Augenblicke seiner Entstehung sehr stark oxydierende Eigenschaften, so daß er Verbindungen bildet, welche der freie Sauerstoff sonst nicht direkt eingeht. So liefert z. B. die Elektrolyse der Salzsäure, besonders wenn ihr ein paar Tropfen Schwefelsäure zugesetzt sind, ein Gemenge freier Chlorsäure und Überchlorsäure, während gleichzeitig freies Chlor-

gas am + Pole und Wasserstoff am — Pole in Masse entweichen. Es haben sich hier also Chlor und Sauerstoff im status nascens direkt mit einander vereinigt.

Taucht man die beiden aus Platin bestehenden Polplatten in eine Auflösung von Bleizucker, so bildet sich unter dem oxydierenden Einflusse des am positiven Pole entwickelten Sauerstoffs Bleihyperoxyd, welches sich auf der positiven Polplatte absetzt.

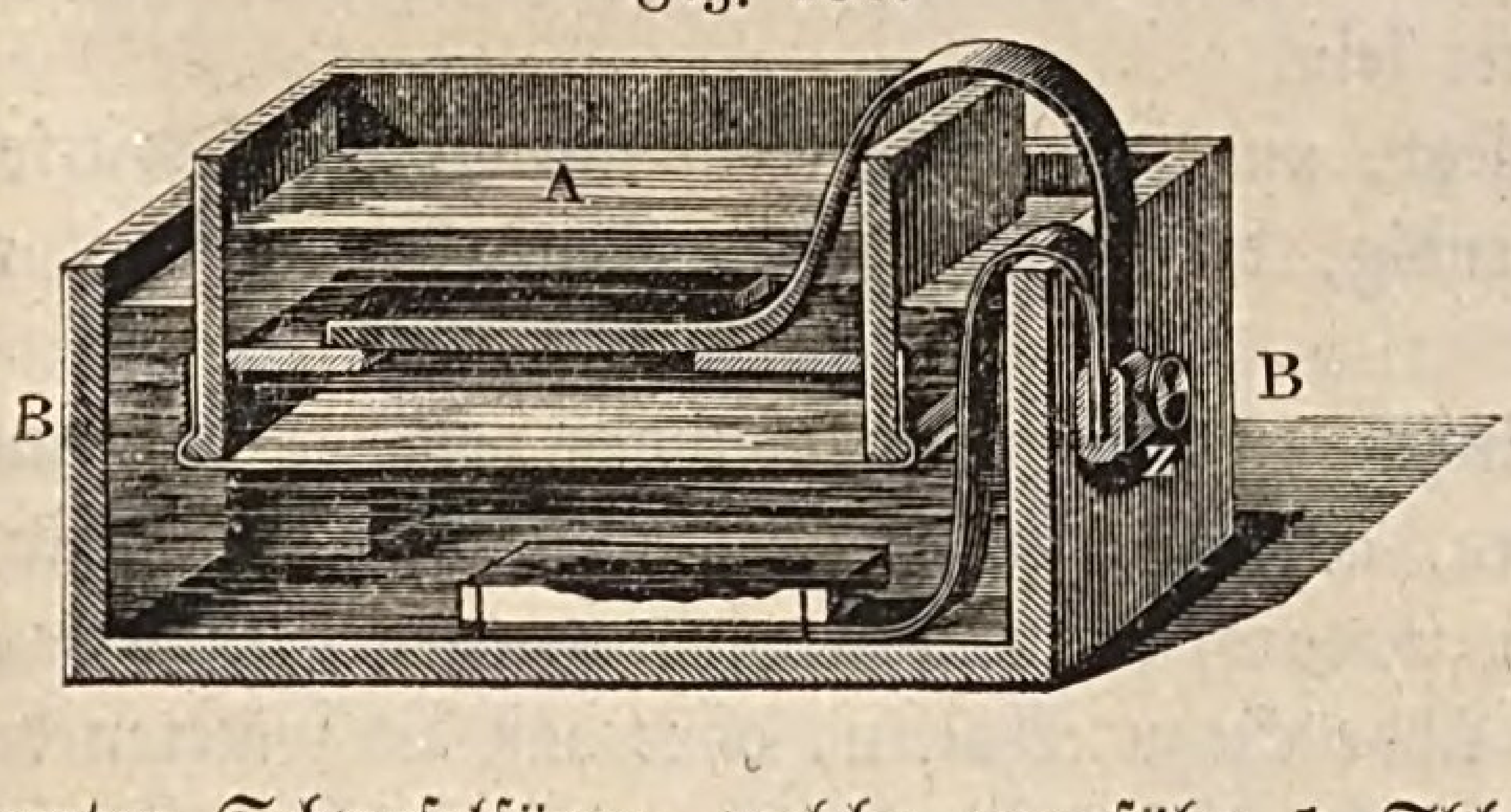
Auf ähnliche Weise und aus demselben Grunde setzt sich am positiven Pole Manganhyperoxyd ab, wenn die Flüssigkeit aufgelöstes Manganoxydul enthält.

Ein ganz dünner auf die eben angedeutete Weise erhaltener Überzug von Manganhyperoxyd oder Bleihyperoxyd zeigt die lebhaftesten Farben (Nobili'sche Farbenringe), welche man zur Verzierung mancher Metallwaren, z. B. Tischglocken, anwendet.

Praktische Benutzung der Elektrolyse. Das auf der negativen Polplatte galvanisch niedergeschlagene Kupfer läßt sich von derselben ablösen, so daß man einen mikroskopisch genauen Abdruck ihrer Oberfläche erhält; wendet man nun als negative Polplatte den metallischen Abdruck (Matrize) einer Münze, einer gestochenen Kupferplatte u. s. w. an, so erhält man auf diese Weise einen kupfernen, dem Original ganz gleichen Abdruck dieser Form. — Dieses Verfahren ist unter dem Namen der Galvanoplastik bekannt. 222

Als Elektromotor genügt zur Erzeugung galvanoplastischer Niederschläge ein schwach geladener Daniell'scher oder Bunsen'scher Becher. Es ist jedoch nicht einmal nötig, eine vom Elektromotor gesonderte Zersetzungszelle anzuwenden, indem die metallische Form selbst die Rolle des elektronegativen Metalles in der Daniell'schen Kette übernehmen kann. Fig. 450 stellt einen zu diesem Zwecke konstruierten Apparat dar. Ein Gefäß A, welches oben offen ist, dessen Boden aber durch eine Schweins- oder Ochsenblase gebildet wird, ist so in ein weiteres Gefäß B eingesetzt, daß der Boden von A ungefähr 2 Zoll über dem Boden des Gefäßes B sich befindet. Das Gefäß A wird mit stark verdünnter Schwefelsäure, welche ungefähr 1 Thl. Schwefelsäure auf 40 Thle. Wasser enthält, das Gefäß B aber mit einer konzentrierten Lösung von Kupfervitriol gefüllt, in die man noch Kupfervitriolkrystalle hineinlegt. In die Flüssigkeit des oberen Gefäßes wird dann eine amalgamierte Zinkplatte, in die Flüssigkeit des unteren Gefäßes aber die aus einem elektronegativen Metalle bestehende Form eingesetzt.

Fig. 450.



Auf irgend eine Weise muß dafür gesorgt sein, daß die Zinkplatte in einiger Entfernung über der Blase gehalten wird, welche den Boden des Gefäßes *A* bildet; ferner empfiehlt es sich, über der Blase ein Stück Leinen auszubreiten, damit Unreinigkeiten und Metallstückchen, welche von der Zinkplatte herabfallen, nicht mit der Blase in Berührung kommen.

Die Zinkplatte ist mit einem Zinkstreifen versehen, welcher bei *z* durch eine Klemmschraube an einen Metallstreifen angedrückt wird, der zur elektronegativen Form führt.

Sehr zweckmäßig stellt man eine solche, als Matrize dienende Form aus Guttapercha her, indem man die durch heißes Wasser erweichte Masse auf den zu vervielfältigenden Gegenstand mittels einer Presse aufdrückt. Um ein Anhaften zwischen der Guttapercha und dem Originale zu verhindern, wird letzteres mit einer feinen Öl- oder Graphitschicht überzogen. Die Presse wird erst nach vollständigem Erkalten der Guttapercha geöffnet.

Eine solche Form ist freilich weder leitend noch elektromotorisch; sie wird es erst dadurch, daß man die Fläche derselben, auf welcher sich das Kupfer absetzen soll, mit einer zarten Schicht von Graphit überzieht, welche mittels eines weichen Pinsels aufgetragen wird. Diese Form wird sodann auf einem Bleistreifen befestigt, indem man sie mittels mehrerer Kupferstifte, welche die leitende Verbindung zwischen der Graphitschicht und dem Bleistreifen herstellen, aufnietet. Diese Graphitschicht bildet die negative Polplatte.

Der Bleistreifen, welcher bei *z* mit dem zur Zinkplatte führenden Zinkstreifen zusammengepreßt ist, muß, soweit er in die Lösung von Kupfervitriol eintaucht, mit einem isolierenden Überzuge versehen sein, den man etwa durch Anstreichen mit einer Siegellacklösung herstellen kann.

Der Strom, welcher durch den Apparat cirkuliert, ist nur schwach; das Kupfer setzt sich langsam auf die Graphitfläche ab. Je nachdem der Strom stärker oder schwächer ist, ist in einem oder mehreren Tagen die Kupferschicht dick genug zum Abnehmen. Bei schwächeren Strömen wird der Kupferniederschlag am gleichförmigsten; deshalb darf die Flüssigkeit, in welcher sich die Zinkplatte befindet, nur schwach sauer sein.

Je mehr Kupfer sich absetzt, um so rascher lösen sich die Kupfervitriolkrystalle; es ist deshalb notwendig, der Lösung solche Krystalle von Zeit zu Zeit wieder zuzusetzen.

Man hat in neuerer Zeit sehr wichtige Anwendungen von der Galvanoplastik gemacht; es ist gelungen, auf diese Weise Holzstiche mit aller Schärfe des Originals zu vervielfältigen, wodurch es möglich wird, von einem und demselben Originale beliebig viele Abdrücke zu erhalten, ohne daß die späteren den früheren nachstehen. (Die Holzstiche dieses Werkes sind mit solchen Kupfertypen gedruckt.)

Ebenso wie sich aus einer Auflösung von Kupfervitriol auf galvanischem Wege Kupfer am negativen Pole der Säule absetzt, setzen sich auch andere Metalle, wie Gold, Silber, Nickel, aus einer geeigneten Auflösung am negativen Pole ab, und man kann auf diese Weise andere Metalle mit einer dünnen

Schicht von Gold, Silber oder Nickel überziehen. Darauf gründet sich die galvanische Vergoldung, Versilberung und Vernickelung.

Ein Stück Kupfer oder Eisen wird, für sich allein in verdünnte Schwefelsäure oder in eine Kochsalzlösung getaucht, angegriffen; sobald es aber unter der Flüssigkeit mit einem mehr elektropositiven Metalle, z. B. mit Zink, in Berührung gebracht wird, bildet sich eine einfache galvanische Kette, das Kupfer oder das Eisen wird nun als das elektronegative Element nicht mehr angegriffen, dagegen wird das Zink rascher oxydiert, als es für sich allein der Fall gewesen wäre. Darauf gründet sich Davy's Versuch, durch Zinknägel den Kupferbeschlag der Schiffe zu schützen. Dasselbe Princip ist auch in Anwendung gebracht worden, um das Anfressen der eisernen Pfannen zu verhindern, in welchen Salzsole versotten wird.

Das elektrolytische Gesetz. Das käufliche Zink wird von 223
verdünnter Schwefelsäure stark angegriffen; wendet man also zur Konstruktion der Säule gewöhnliches Zink an, so findet in jedem Elemente schon eine rasche Auflösung des Zinks statt, ehe noch die Säule geschlossen ist. Faraday nennt diese vom Strom ganz unabhängige Wirkung lokale Aktion. Sie wird bedeutend vermindert, ja fast aufgehoben, wenn man die Zinkplatten amalgamiert, d. h. wenn man die Oberfläche der Zinkplatten mit Quecksilber überzieht, was stets geschehen muß, wenn kein unnötiger Verbrauch von Zink und Säure stattfinden soll. Die lokale Aktion hört aber ganz auf, wenn das amalgamierte Zink nicht in verdünnte Schwefelsäure, sondern in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, welche für sich das Zink nicht angreift, z. B. in eine Lösung von Kochsalz, oder Zinkvitriol. Wird also z. B. in einer Daniell'schen Säule die verdünnte Schwefelsäure durch Zinkvitriollösung ersetzt, so findet keinerlei Zersetzung statt, so lange die Säule nicht geschlossen ist. Sobald aber die Schließung erfolgt, wird in jedem Element eine gewisse Menge Zink aufgelöst und dafür eine gewisse Menge Kupfer niedergeschlagen, welche der Stromstärke proportional ist.

Als Faraday (1834) in den Stromkreis einer solchen Säule ein Voltameter einschaltete, ergab sich, daß für jeden Gewichtsteil Wasserstoffgas, welcher sich an der negativen Polplatte des Voltameters entwickelte, in jedem Elemente 32,45 Gewichtsteile Zink aufgelöst und 31,55 Gewichtsteile Kupfer niedergeschlagen wurden. Nun aber verhalten sich auch die Gewichte der chemischen Äquivalente von Wasserstoff, Zink und Kupfer zu einander wie 1 : 32,45 : 31,55. Für jedes Äquivalent Wasserstoff also, welches sich in dem Voltameter entwickelt, wird in jedem Elemente der Säule 1 Äquivalent Zink aufgelöst und 1 Äquivalent Kupfer niedergeschlagen.

Wenn derselbe Strom durch vier Zerlegungszellen geleitet wird, von denen die erste angesäuertes Wasser, die zweite Chlorsilber, die dritte Chlorblei, die vierte Chlorzinn, alle aber im flüssigen Zustande, enthält, so verhalten sich die Mengen Wasserstoffgas, Silber, Blei und Zinn, welche an den vier negativen

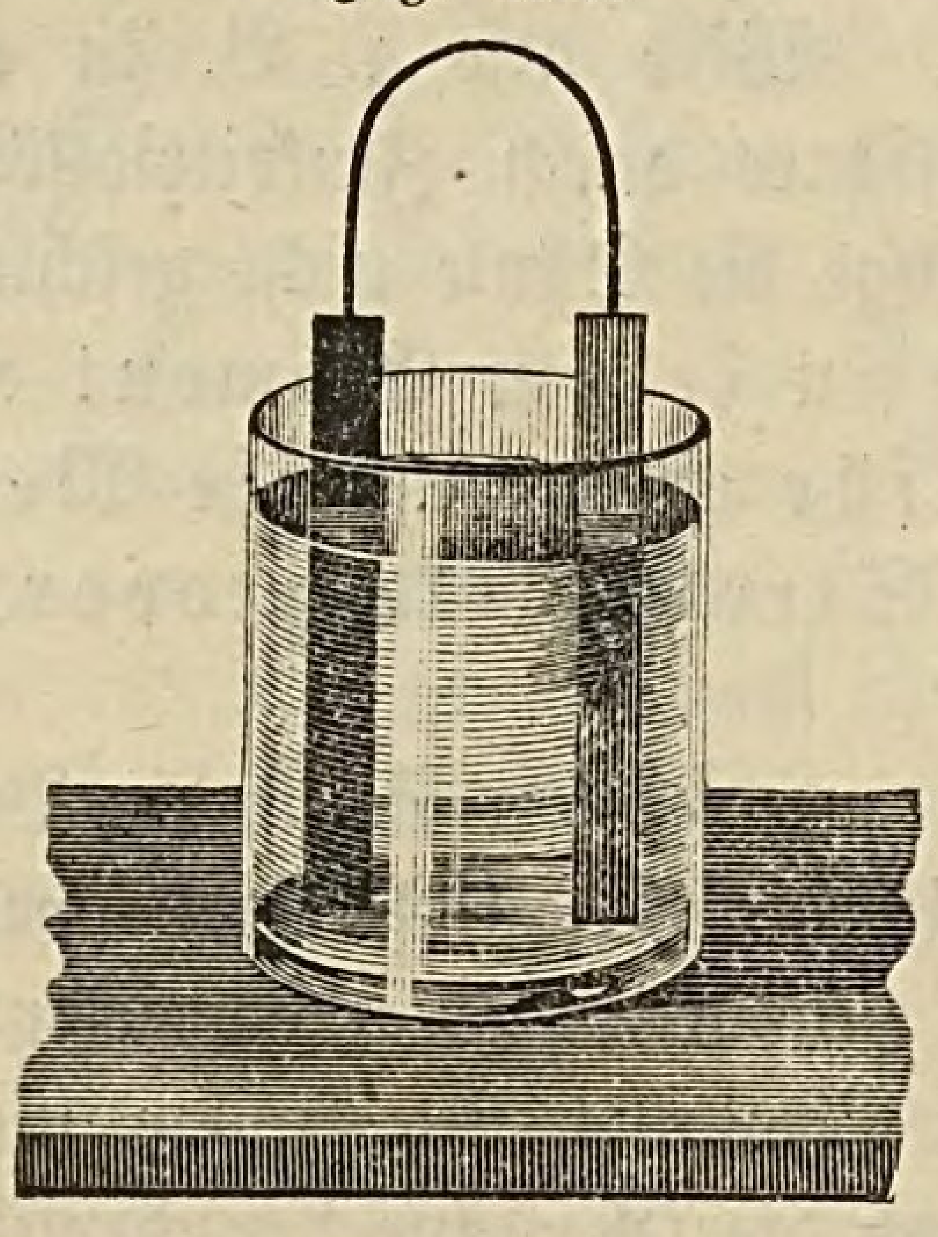
Polen gleichzeitig ausgeschieden werden, wie 1 : 108 : 103,6 : 57,9, während an den positiven Polen Sauerstoffgas und Chlor, und zwar im Verhältnisse von 8 : 35,4 ausgeschieden werden. In gleichem Verhältnisse stehen aber auch die Äquivalentgewichte dieser Körper. Somit sind die in den Erregungszellen (Elementen) und in den Zerlegungszellen durch die elektrolytische Aktion gleichzeitig aufgelösten und abgeschiedenen Gewichtsmengen der Stromstärke sowie den chemischen Äquivalenten der aufgelösten oder abgeschiedenen Körper direkt proportional.

Die hier entwickelten Beziehungen zwischen Stromstärke und chemischer Aktion hat Faraday mit dem Namen des elektrolytischen Gesetzes bezeichnet.

224 **Theorie der konstanten Säulen.** Die gewöhnlichen Volta'schen Säulen, in welchen nur eine Flüssigkeit angewandt wird, geben, wie schon bemerkt wurde, im ersten Augenblicke einen sehr kräftigen Strom, der aber rasch abnimmt, während in den Daniell'schen, den Grove'schen und Bunsen'schen Batterieen der Strom mit nahezu unveränderter Stärke fortdauert. Jetzt, wo wir die chemischen Erscheinungen in der Kette kennen gelernt haben, können wir uns davon Rechenschaft geben, warum in diesen Apparaten der Strom konstant bleibt, in jenen aber so rasch abnimmt.

In ein Gefäß, Fig. 451, welches mit einer Lösung von Zinkvitriol gefüllt ist, werde eine Zink- und eine Kupferplatte eingetaucht, welche oben durch einen Kupferdraht verbunden sind. Auch hier wird anfangs ein ziemlich kräftiger Strom entstehen, der bald abnimmt und endlich ganz aufhört. Der Grund dieses Aufhörens ergiebt sich bald, wenn man den Vorgang der Zersetzung betrachtet. Das Zinksalz der Lösung wird nämlich zersetzt, der Sauerstoff und die Schwefelsäure gehen an die Zinkplatte, um Zinkvitriol zu bilden, während sich auf der anderen Seite metallisches Zink auf der Kupferplatte absetzt. Nach einiger Zeit hat sich die Kupferplatte ganz mit Zink überzogen, und nun hört der Strom ganz auf, weil die erregende Flüssigkeit auf beiden Seiten mit dem gleichen Metall, nämlich mit Zink, in Berührung ist.

Fig. 451.



Nehmen wir nun verdünnte Schwefelsäure statt der Zinkvitriollösung, so wird das Wasser der zwischen der Zink- und Kupferplatte befindlichen Flüssigkeit zersetzt; statt daß sich, wie im vorigen Falle, Zink an der Kupferplatte absetzte, wird nun hier Wasserstoffgas frei; die Kupferplatte überzieht sich mit einer Schicht von Wasserstoffgas, welches sich gegen die Flüssigkeit elektromotorisch ähnlich verhält, wie Zink. Das Wasserstoffgas an der Kupferplatte

kann aber die elektromotorische Kraft der Zinkplatte und der Flüssigkeit nicht so vollständig aufheben, wie es beim Zinküberzug der Fall war, weshalb denn auch nur eine Schwächung des Stromes und kein vollständiges Aufhören desselben erfolgt.

Diese von der Wasserstoffausscheidung an der negativen Platte eines Volta'schen Elementes herrührende Schwächung der ursprünglichen elektromotorischen Kraft wird mit dem Namen der galvanischen Polarisation bezeichnet.

Ist somit die Ursache richtig erkannt, welche die Schwächung des Stromes in gewöhnlichen Säulen veranlaßt, so ergiebt sich leicht, wie die galvanische Polarisation vermieden werden kann; man hat nämlich nur dafür zu sorgen, daß die Abscheidung des Wasserstoffs an der negativen Platte der elektromotorischen Becher verhindert wird.

In der Becquerel'schen Kette setzt sich nicht Wasserstoff, sondern metallisches Kupfer an der Kupferplatte an, und somit bleibt stets eine reine Kupferoberfläche mit der Flüssigkeit in Berührung. In der Grove'schen Batterie ist das Platin und in der Bunsen'schen die Kohle von Salpetersäure umgeben; die Salpetersäure ist aber eine so sauerstoffreiche Flüssigkeit, daß der durch den Strom ausgeschiedene und mit ihr in Berührung kommende Wasserstoff sogleich wieder oxydiert wird, wobei sich dann Untersalpetersäure bildet, welche teils von der Salpetersäure aufgelöst wird, teils als ein gelbbraunes Gas entweicht. In dem Bunsen'schen Chromsäureelement verbindet sich der an der Kohlenplatte frei werdende Wasserstoff mit einem Teil des Sauerstoffs der Chromsäure zu Wasser; die Chromsäure aber wird dadurch zu Chromoxyd reduziert, welches sich mit der Schwefelsäure und dem Kali zu schwefelsaurem Chromoxydkali oder Chromalaun verbindet, der in der Flüssigkeit gelöst bleibt.

Magnetische Wirkungen des galvanischen Stromes. 225

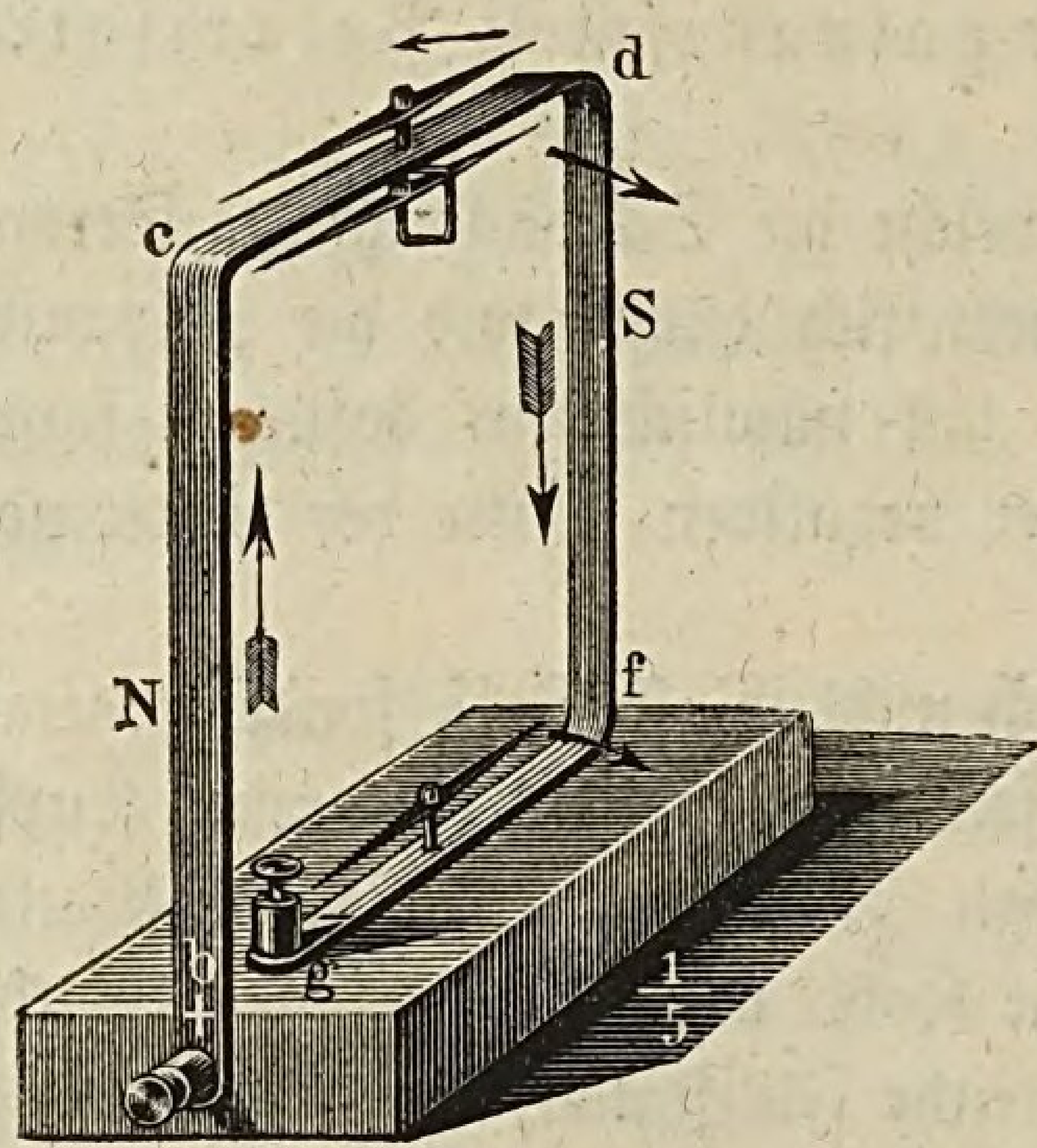
Schon lange wußte man, daß unter Umständen kräftige elektrische Entladungen eine Wirkung auf die Magnetnadel ausüben; man hatte z. B. beobachtet, daß die Kompaßnadeln auf Schiffen, welche vom Blitze getroffen waren, ihre Polarität verloren. Während nun viele Physiker versuchten, solche Wirkungen durch die Entladung von Leydner Flaschen hervorzubringen, ohne jedoch zu bestimmten Resultaten zu kommen, entdeckte Oersted in Kopenhagen während des Winters 1819 auf 1820 die Einwirkung des galvanischen Stromes auf die Magnetnadel.

Den Fundamentalversuch über die Einwirkung eines galvanischen Stromes auf die Nadel kann man auf folgende Weise anstellen: ein Streifen Kupferblech wird so gebogen, daß er ein Quadrat bildet, dessen Seiten etwa 25 cm lang sein können; an den beiden Enden desselben, bei b und g, Fig. 452 (a. f. S.), sind Schraubklemmen aufgesetzt, in welchen die Zuleitungsdrähte für den Strom festgeschraubt werden können. In der Mitte auf dem horizontalen Stücke cd und auf fg ist eine Stahlspitze befestigt, auf welche eine Magnetnadel aufgesetzt werden kann. Ebenso befindet sich eine Stahlspitze, von einem gebogenen

Kupferdraht getragen unter der Mitte von *cd*, auf welche ebenfalls eine Magnetnadel aufgesetzt wird.

Diese Vorrichtung wird nun so aufgestellt, daß die Ebene des Quadrates in die Ebene des magnetischen Meridians fällt, daß sich also die Magnetnadeln mit *cd* und *fg* parallel stellen. Sobald nun ein Strom durch den Apparat hindurchgeht, werden die Magnetnadeln abgelenkt, und zwar in der durch die ungefiederten Pfeile bezeichneten Richtung, wenn der positive Strom bei *b* ein- und bei *g* austritt und wenn *N* die Nordseite, *S* die Südseite des Apparates bildet.

Fig. 452.



Um die Richtung der Ablenkung zu bestimmen, hat Ampère (1822) folgende Regel aufgestellt: Man denke sich in den Strom eine kleine menschliche Figur so eingeschaltet, daß der positive Strom bei den Füßen ein- und am Kopfe austritt; wenn nun diese Figur ihr Gesicht der Nadel zukehrt, so wird der Nordpol der Nadel immer nach der linken, der Südpol dagegen nach der rechten Seite dieser Figur hin abgelenkt.

In dem Stromstücke *cd* liegt die Figur wagerecht, den Kopf gegen *d*, die Füße gegen *c* gekehrt. Wird die Nadel über den Strom gehalten, so muß die Figur auf dem Rücken liegen, wenn ihr Gesicht der Nadel zugekehrt sein soll; bei dieser Lage der Figur liegt ihre linke Seite rechts von *cd*. Wird die Nadel unter *cd* gehalten, so muß die Figur das Gesicht nach unten kehren und dann liegt ihre linke Seite links von *cd*.

Für das Stromstück *fg* sind die Füße der Figur gegen *f*, der Kopf gegen *g* gekehrt; wenn die Figur auf dem Rücken liegt, befindet sich ihre linke Seite links von *fg*, wenn sie aber auf dem Leibe liegt, rechts von *fg*.

Wenn ein in der Ebene des magnetischen Meridians sich bewegender Strom allein auf die Nadel wirkte, so würde sie sich rechtwinklig auf den magnetischen Meridian stellen; außer dem Strome wirkt aber auch noch der Erdmagnetismus, welcher die Nadel in den Meridian zurückzudrehen sucht. Unter dem Einflusse dieser beiden Kräfte wird also die Nadel eine Zwischenlage annehmen, sie wird mit dem magnetischen Meridian einen Winkel bilden, der um so größer wird, sich also einem rechten um so mehr nähert, je größer die Stromkraft im Vergleiche zur magnetischen Erdkraft ist.

Auch der vertikal gerichtete Strom in *bc* und *df*, Fig. 452, wirkt ablenkend auf die Nadel, und zwar findet man die Richtung der Ablenkung ebenfalls nach der Ampère'schen Regel. Man denke sich nur die vertikal stehende Figur dem Nordende zugewandt, so muß sich dieses Nordende nach der Linken

drehen; dabei ist aber zu bedenken, daß für den aufsteigenden Strom *bc* die Figur auf den Füßen, für den niedergehenden *df* auf dem Kopfe steht.

Stellt man diese Wirkungen zusammen, welche die Stromstücke *bc*, *dc*, *df* und *fg* auf eine Nadel ausüben, welche sich innerhalb des Raumes *bcdfg* befindet, so ergiebt sich, daß alle diese Stromstücke die Nadel in gleichem Sinne abzulenken suchen, und zwar läßt sich in diesem Falle das Gesetz der Ablenkung in folgender Weise ausdrücken: das Südende der Nadel wird nach der Seite hin abgelenkt, von welcher aus betrachtet der Strom die Nadel in demselben Sinne umkreist, in welchem sich der Zeiger einer Uhr bewegt.

Dieses Gesetz gilt natürlich auch für den Fall, daß der Strom in einem Kreise um die Nadel herumgeführt wird.

Bringt man die Nadel über das Stromstück *cd*, so wird ihr Nordende nach derselben Seite hin abgelenkt wie das Südende einer innerhalb *bcdfg* befindlichen Nadel. Davon hat man bei der Konstruktion des Multiplikators Anwendung gemacht, den wir sogleich näher betrachten wollen.

Der Multiplikator. Kurz nachdem Oersted die wichtige Ent- 226
deckung gemacht hatte, daß ein elektrischer Strom, welcher an einer Magnetnadel vorbei oder um dieselbe herumgeführt wird, eine Ablenkung aus dem magnetischen Meridian bewirkt, konstruierten gleichzeitig Poggendorff und Schweigger ein Instrument, welches unter dem Namen Multiplikator oder Galvanometer bekannt, den Zweck hat, schwache galvanische Ströme dadurch bemerkbar zu machen, daß diese die Nadel in Drahtwindungen vielmal umkreisen (Fig. 453) und deshalb bedeutend ablenken.

Fig. 453.

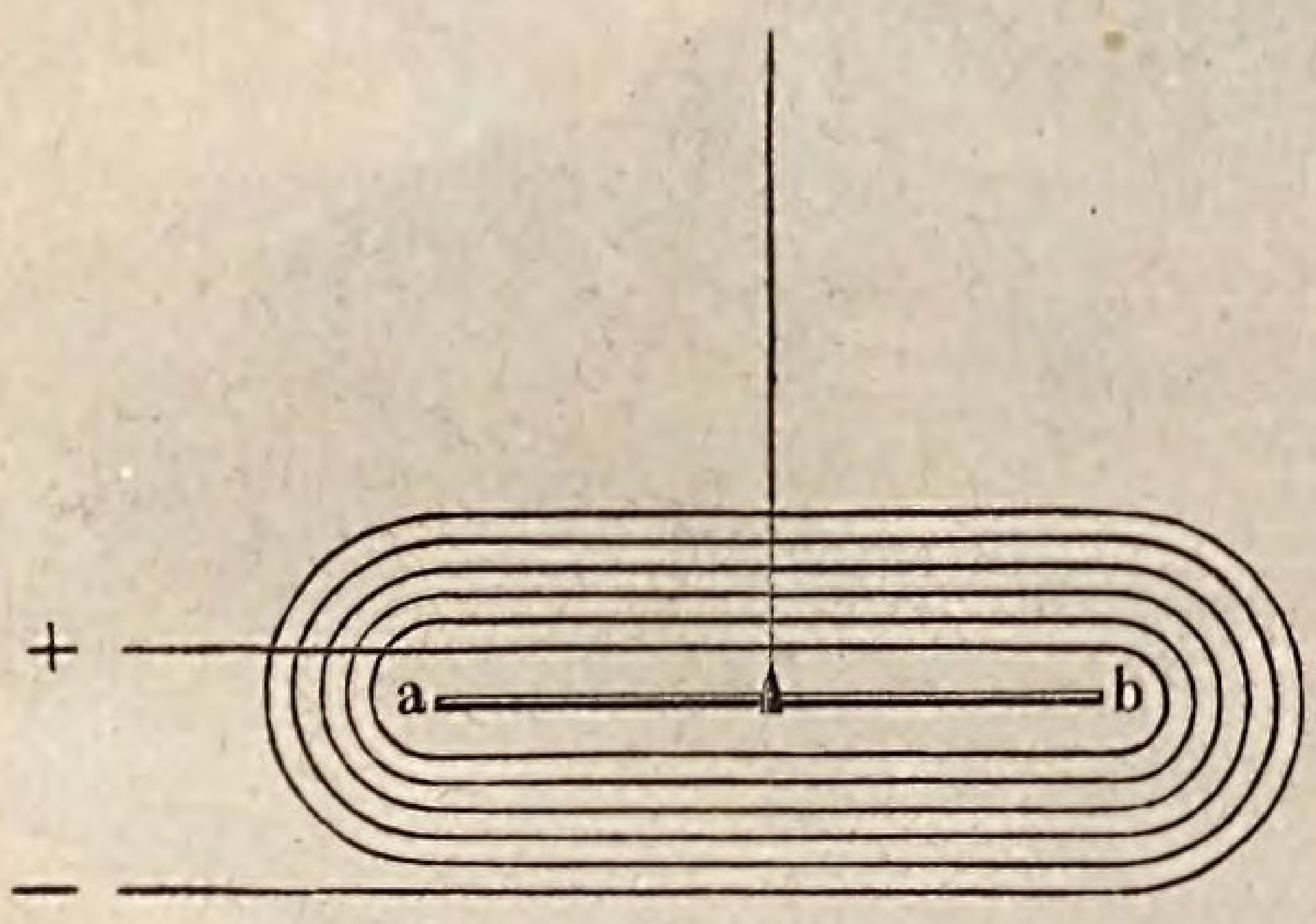
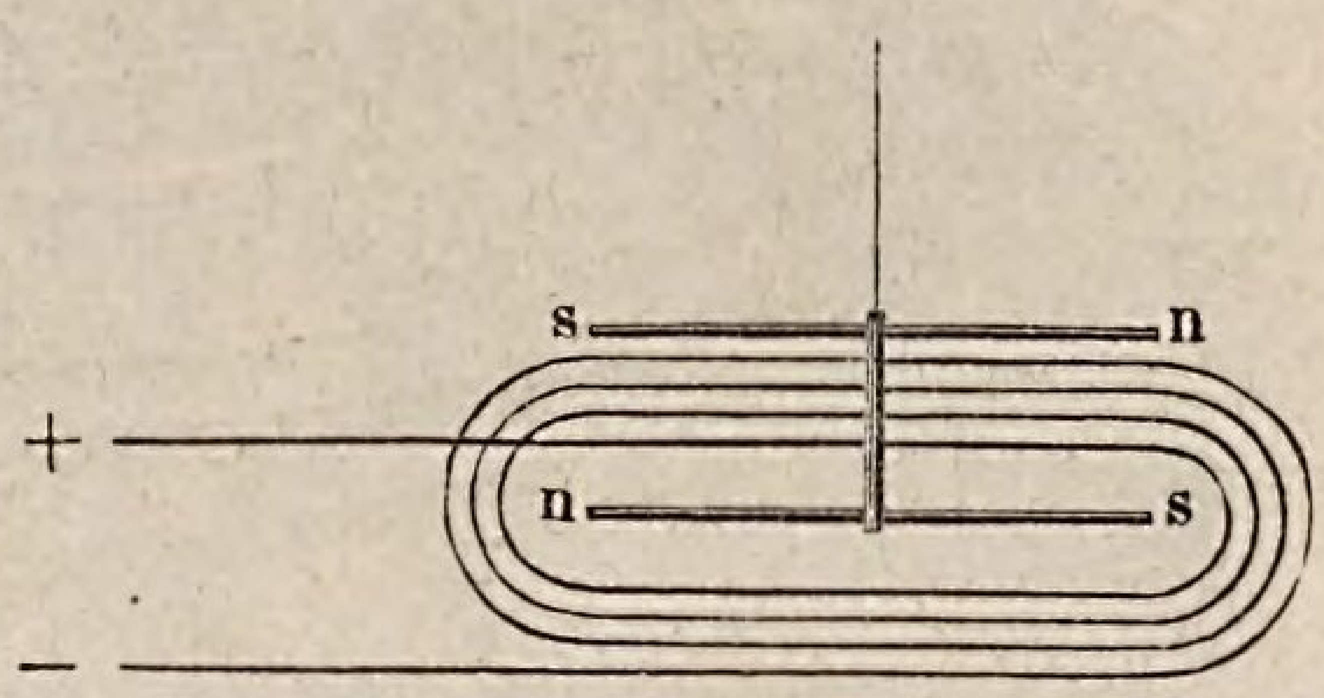


Fig. 454.



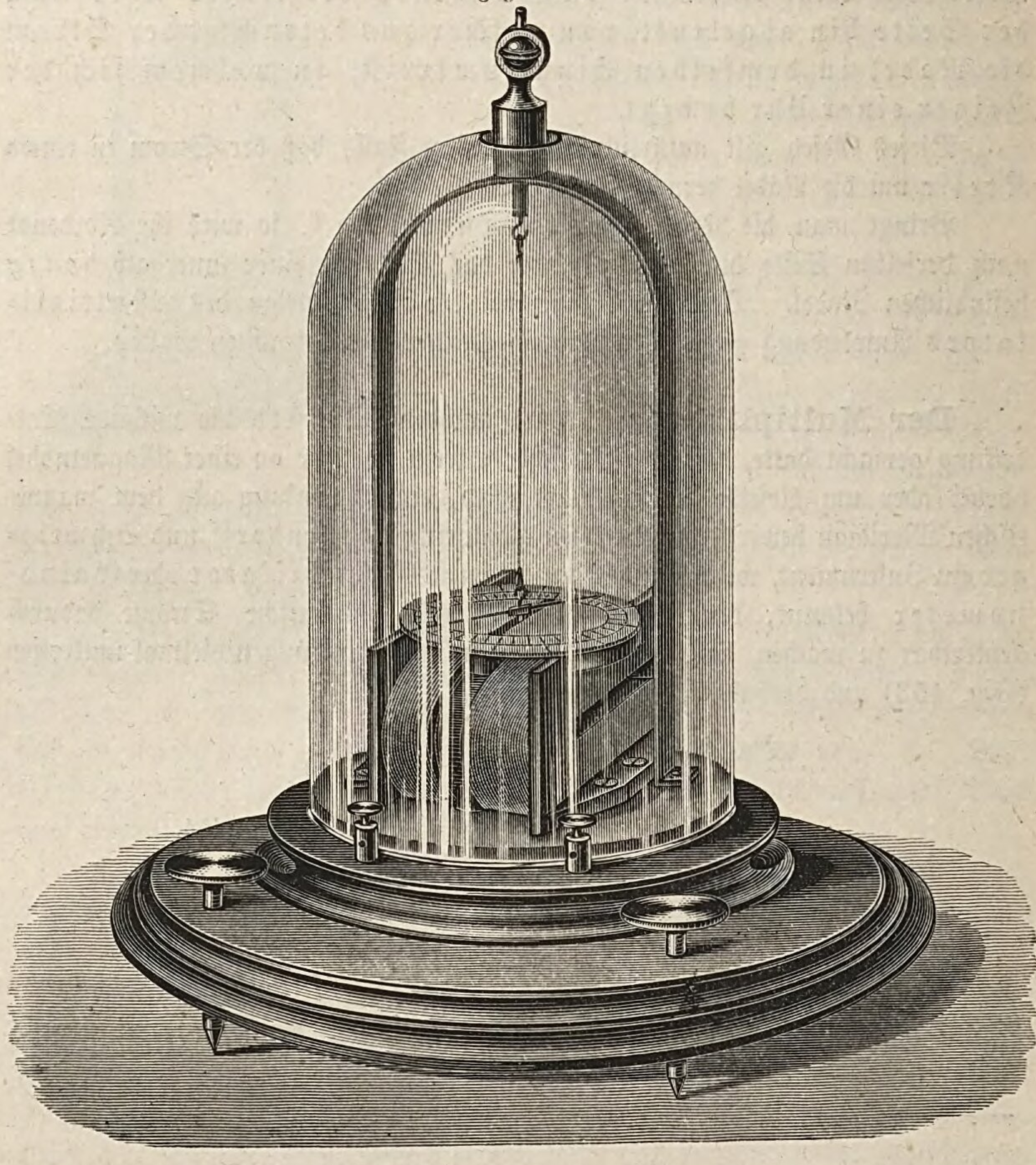
Damit die Nadel *ab* möglichst frei beweglich sei, ist sie nicht auf eine Spitze gesetzt, sondern an einen Kokonfaden aufgehängt.

Nobili hat den Multiplikator dadurch bedeutend empfindlicher gemacht, daß er statt einer einzigen Magnetnadel ein sogenanntes astatisches Nadelpaar in Anwendung brachte, wie dies in Fig. 454 schematisch dargestellt ist. Es sind hier zwei Magnetnadeln so mit einander verbunden, daß sie zwar einander parallel sind, ihre gleichnamigen Pole aber entgegengesetzte Richtung haben.

Bei einem solchen Systeme von zwei Nadeln ist die richtende Kraft des Erdmagnetismus außerordentlich gering, denn sie ist nur die Differenz der Kräfte, mit welchen der Erdmagnetismus jede einzelne Nadel zu richten strebt. Wäre der Magnetismus beider Nadeln vollkommen gleich, so würde die richtende Kraft, welche die Erde auf dieses System ausübt, gleich Null sein.

Während nun ein solches astatisches Nadelpaar nur mit sehr geringer

Fig. 455.



Kraft durch den Erdmagnetismus gerichtet wird, summiert sich die Wirkung des Stromes auf beide Nadeln; denn indem die eine Nadel innerhalb der Windungen, die andere über denselben hängt, werden beide Nadeln nach gleicher Richtung durch den Strom abgelenkt.

Fig. 455 stellt die Gesamteinrichtung eines Multiplikators dar. Der übersponnene Draht ist auf einen Holzrahmen aufgewickelt; die Drahtenden sind mit zwei auf der Vorderseite der Figur sichtbaren Messingsäulchen verbun-

den, in welche man die Zuleitungsdrähte einschrauben kann. Unter der oberen Nadel befindet sich ein Teilkreis. Das Nadelpaar hängt an einem einfachen Seidenfaden und kann nach Belieben etwas gehoben oder gesenkt werden. Die Glasglocke, welche das Ganze bedeckt, dient zur Abhaltung der Luftströmungen.

Je nach den Umständen wendet man Multiplikatoren an, die wenige Windungen eines dickeren, oder viele Windungen eines dünneren Drahtes enthalten.

Das Galvanometer liefert uns ein Mittel, die Theorie der konstanten Ketten, wie sie oben auseinandergesetzt wurde, durch direkte Versuche zu bestätigen. — Nach Paragraph 224 beruht die rasche Abnahme der Stromstärke der gewöhnlichen Volta'schen Säulen auf der galvanischen Polarisation, d. h. darauf, daß sich die negative Platte mit einer Schicht von Wasserstoffgas überzieht, welches der ursprünglichen elektromotorischen Kraft der Säule entgegenwirkt. Ähnliches findet an den Platten eines Voltameters, Fig. 447, statt. Indem die negative Polplatte sich mit Wasserstoff, die positive dagegen sich mit Sauerstoff überzieht, wird die Zerlegungszelle selbst elektromotorisch, und zwar wirkt ihre elektromotorische Kraft dem Strome entgegen. Daher kommt es auch, daß man mit einem einzelnen Bunsen'schen oder Grove'schen Elemente noch keine merkliche Wasserzersetzung erzeugen kann. — Diese in den Voltametern auftretende elektromotorische Gegenkraft läßt sich durch folgenden Versuch nachweisen. Man bringe in den Schließungsbogen eines einzelnen konstanten Elementes *S*, Fig. 456, einen Wasserzersetzungsapparat (Voltameter) *V*

Fig. 456.

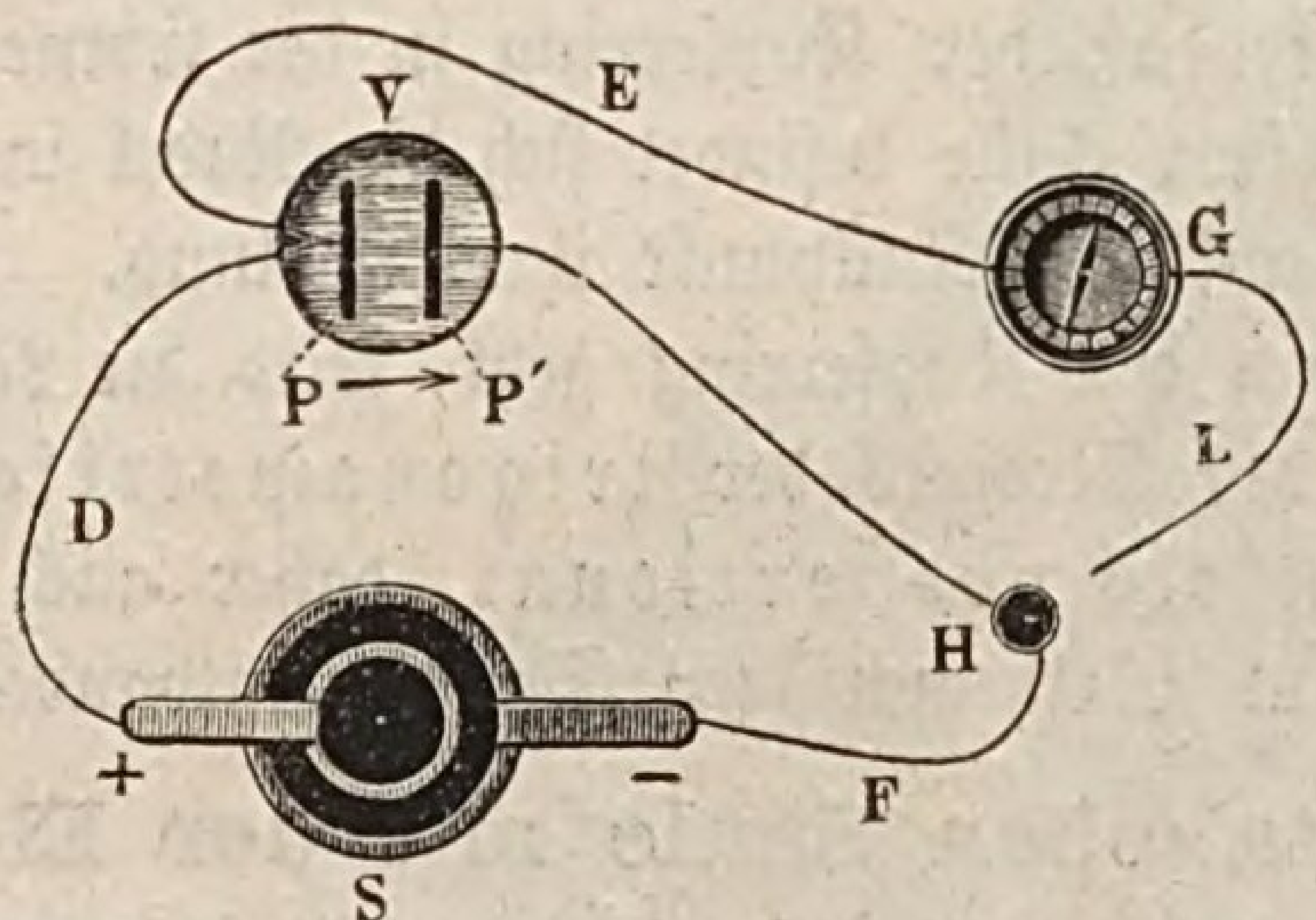
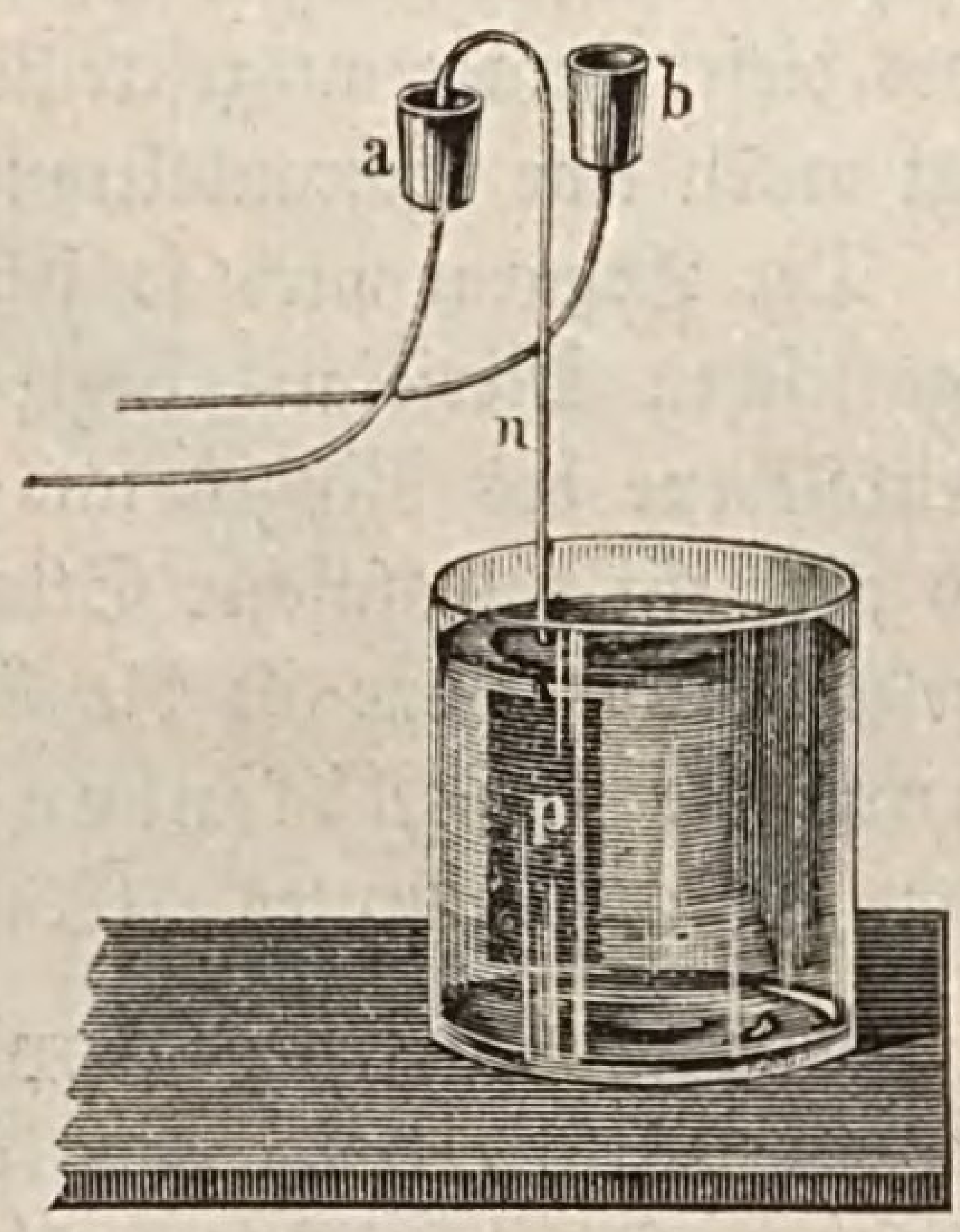


Fig. 457.



und hebe die Schließung, nachdem sie kurze Zeit gedauert hat, wieder auf. Verbindet man dann die beiden Platten des Voltameters *V* mit den beiden Drahtenden des Galvanometers *G*, so wird dieses einen Strom zeigen, welcher der Richtung nach demjenigen entgegengesetzt ist, welchen das galvanische Element *S* vorher durch das Voltameter *V* gesandt hatte.

Dieser Polarisationsstrom ist nur vorübergehend, er verschwindet bald wieder mit dem Gasüberzug der Voltameterplatten.

Daß es aber wirklich der Gasüberzug ist, welcher den beiden Voltameterplatten ein entgegengesetztes elektromotorisches Vermögen erteilt, hat Schön-

bein auf folgende Weise dargethan. — In Fig. 457 (a. v. S.) seien a und b zwei Quecksilbernäpfchen, welche mit den beiden Drahtenden eines Galvanometers in leitender Verbindung stehen; von a hängt eine wohl gereinigte Platinplatte p in ein Gefäß mit etwas angesäuertem Wasser; eine ganz gleiche Platinplatte tauche man nun eine Zeitlang in ein mit Wasserstoffgas gefülltes Gefäß, so daß sich diese Platinplatte, die wir mit p' bezeichnen wollen, mit einer Atmosphäre von Wasserstoffgas überzieht; bringt man nun diese Platte p' in dieselbe Flüssigkeit, in welche p eintaucht, so wird das Galvanometer augenblicklich einen Strom anzeigen, sobald man den an p' befindlichen Drahthaken in das Quecksilbernäpfchen b eintaucht, und zwar geht der positive Strom von p' durch die Flüssigkeit zu p; die mit Wasserstoff überzogene Platinplatte verhält sich also gegen die reine wie Zink zu Kupfer.

227 **Die Tangentenbussole.** Zum Nachweise stärkerer Ströme braucht man keine astatische Nadel anzuwenden und die Drahtwindungen nicht so nahe um die Nadel herumzuführen, wie dies beim Multiplikator der Fall ist, sondern es können dazu Instrumente angewendet werden, bei welchen der Ablenkungswinkel in einem einfachen Verhältnisse zu der Stromstärke steht. Der einfachste und zweckmäßigste Apparat zur Messung stärkerer Ströme ist die sogenannte Tangentenbussole, welche Fig. 458 abgebildet ist. Ein kreisförmig gebogener Kupferstreifen, in dessen Mittelpunkt sich eine Magnetnadel befindet, endet unten mit zwei geraden Kupferstreifen ab und cd, welche durch ein zwischen dieselben gelegtes Stück Holz oder Elfenbein von einander isoliert sind. Jedes dieser gerade ausgestreckten Enden des kreisförmig gebogenen Streifens trägt unten eine Schraubklemme zum Einschrauben der Zuleitungsdrähte.

Der Apparat wird so festgestellt, daß der Kupferring in der Ebene des magnetischen Meridians liegt; in diesem Falle befindet sich die Nadel in der Vertikalebene des Ringes und zeigt auf den Nullpunkt ihrer Teilung. Sobald aber ein galvanischer Strom durch den Kupferring geht, wird die Nadel abgelenkt, und zwar ist die Stärke des Stromes der trigonometrischen Tangente des Ablenkungswinkels proportional, daher auch der Name des Instrumentes. (Näheres im Mathematischen Supplementbande.)

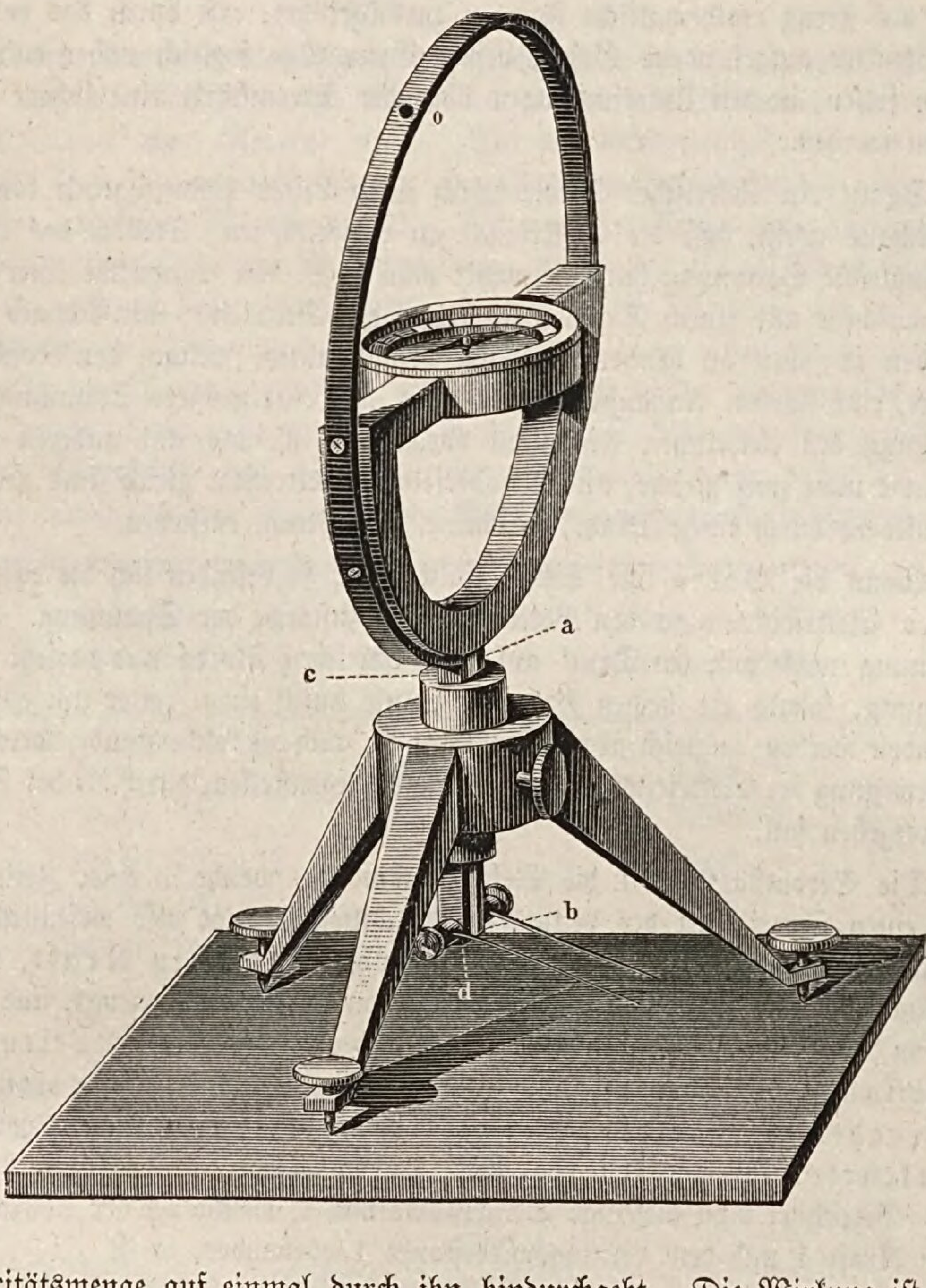
228 **Vergleichung der Volta'schen Säule mit der Elektrisiermaschine.** Das Agens, welches in den Phänomenen des Galvanismus wirkt, ist vollkommen dasselbe, welches auch die Elektrisiermaschine und das Elektrophor liefert. Das eine Mal aber haben wir mit einer reichen Elektricitätsquelle von geringer, das andere Mal mit einer armen Quelle von hoher Spannung zu thun.

Die Spannung der Reibungselektricität ist so groß, daß sie das Überspringen von Funken auf ziemlich große Entfernungen bewirkt, während die Spannung an den Polen Volta'scher Säulen so gering ist, daß man des Elektrometers und des Kondensators bedarf, um sie überhaupt nachweisen zu können. Es ist deshalb auch für galvanische Leitungen durchaus keine sehr sorgfältige Isolierung nötig.

Daß aber andererseits die Volta'sche Säule eine bei weitem größere Quantität von Elektricität liefert als die Elektrisiermaschine, geht aus folgender Vergleichung hervor.

Wenn man eine große Leydner Flasche durch einen dünnen Draht entladet, so wird dieser, wie wir gesehen haben, glühend, weil eine ziemlich große

Fig. 458.



Elektricitätsmenge auf einmal durch ihn hindurchgeht. Die Wirkung ist aber nur momentan; in einem Augenblicke geht alle Elektricität, welche man durch längeres Drehen der Maschine in der Flasche angehäuft hatte, durch den dünnen Draht hindurch. Ganz anders verhält es sich, wenn man die beiden Pole eines großplattigen galvanischen Apparates durch einen kurzen Draht verbindet. Der Draht wird glühend, selbst wenn er bei weitem dicker ist als der Draht, den man durch den Entladungsschlag der Leydner Flasche ins Glühen bringt,

und bleibt glühend, so lange der Strom durch den Draht hindurchgeht. In jedem Augenblicke liefert also der galvanische Apparat ungleich mehr Elektricität, als man durch längeres Drehen der Maschine in der Flasche anhäufen konnte.

229 **Das Ohm'sche Gesetz.** Die Beziehungen der Stromstärke zu der Zahl und der Größe der Plattenpaare wurden durch G. S. Ohm im Jahre 1826 auf streng mathematische Formen zurückgeführt; erst durch das von diesem Physiker aufgefundene Gesetz, dessen Grundzüge sogleich näher entwickelt werden sollen, ist den Untersuchungen über die Stromstärke eine sichere Basis gegeben worden.

Damit ein elektrischer Strom durch einen Leiter hindurchgehen kann, ist es durchaus nötig, daß die Elektricität an verschiedenen Stellen des Leiters eine ungleiche Spannung hat. Berührt man z. B. den Konduktor einer Elektrisiermaschine mit einem Drahte, so strömt die Elektricität nur deshalb durch denselben ab, weil an demjenigen Ende des Drahtes, welches den Konduktor berührt, eine stärkere Anhäufung und somit auch eine größere Spannung oder Abstoßung des elektrischen Fluidums vorhanden ist, als am anderen Ende. Verbände man zwei gleiche, und mit derselben Elektricität gleich stark geladene Konduktoren durch einen Draht, so könnte kein Strom entstehen.

Wenn die Volta'sche Säule isoliert ist, so befinden sich die entgegengesetzten Elektricitäten an den Polen in dem Zustande der Spannung. Diese Spannung wirkt wie ein Druck auf die elektrischen Fluida und versetzt sie in Bewegung, sobald die beiden Pole der Säule durch einen Leiter mit einander verbunden werden; zugleich aber überwindet sie auch die Widerstände, welche sich der Bewegung der Elektricität in der Leitung entgegenstellen, durch die der Strom hindurchgehen soll.

Die Stromstärke, d. i. die Elektricitätsmenge, welche in einer Zeiteinheit durch einen Querschnitt der Leitung hindurchfließt, hängt also wesentlich von zwei Umständen ab: erstens von der elektromotorischen Kraft, welche die Spannung an den Polen und infolge davon den Strom erzeugt, und zweitens von dem zu überwindenden Widerstande in der Leitung oder dem Leitungswiderstande. Hiernach ist nun leicht einzusehen, daß die Stromstärke im geraden Verhältnisse der elektromotorischen Kraft und im umgekehrten Verhältnisse des Leitungswiderstandes stehen muß. Bezeichnet man diejenige Stromstärke mit 1, welche bei der elektromotorischen Kraft 1 und dem Leitungswiderstande 1 vorhanden, so ist

$$S = \frac{E}{W}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

wenn S die Stromstärke, E die elektromotorische Kraft der Säule und W den gesamten Leitungswiderstand der Kette bezeichnet.

Der Widerstand W zerfällt in zwei Teile; er besteht nämlich erstens aus dem Widerstande, welcher innerhalb des Elektromotors selbst zu überwinden ist

und welchen wir den wesentlichen Leitungswiderstand der Säule nennen und mit w bezeichnen wollen, und aus dem Widerstande des zwischen den Polen der Säule eingeschalteten Schließungsbogens, welcher mit r bezeichnet werden soll. Es ist also $W = w + r$ und demnach geht Gleichung 1) über in

$$S = \frac{E}{w + r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Zur experimentellen Bestätigung des durch die Gleichung 2) ausgesprochenen Gesetzes mag eine Versuchsreihe dienen, bei welcher als Elektromotor ein einzelnes Bunsen'sches Element diente. Als der Schließungsbogen nur aus dem kurzen dicken Zuleitungsdrahte und der Tangentenbussole bestand, war die an letzterer abgelesene Ablenkung 62°. Als nun der Reihe nach 1 mm dicke Kupferdrähte eingeschaltet wurden, deren Länge 5, 10, 40 u. s. w. Meter betrug, so war der gesamte Leitungswiderstand $w + 5$, $w + 10$, $w + 40$, u. s. w., wenn mit w der Widerstand des Elektromotors samt dem unbedeutenden Widerstande der Tangentenbussole und des kurzen dicken Zuleitungsdrahtes bezeichnet wird. Dabei ergaben sich die in folgender Tabelle zusammengestellten Werte der Widerstände und der Ablenkung; die dritte Spalte dieser Tabelle enthält die Tangenten der in der zweiten Spalte aufgeführten Ablenkungswinkel.

Leitungswiderstand	Beobachtete Ablenkung	Tangente des Ablenkungswinkels
$w +$	62°00′	1,880
$w + 5$	40 20	0,849
$w + 10$	28 30	0,543
$w + 40$	9 45	0,172
$w + 70$	6 00	0,105
$w + 100$	4 15	0,074

Nehmen wir die Tangenten der Ablenkungswinkel zum Maß der Stromstärke, so wird Gleichung 2) für die Data des ersten Versuchs

$$1{,}88 = \frac{E}{w}$$

für die Data des zweiten Versuchs aber wird sie

$$0{,}849 = \frac{E}{w + 5}.$$

Aus der Kombination dieser beiden Gleichungen ergiebt sich

$$w = 4{,}11 \text{ und } E = 7{,}727,$$

der wesentliche Leitungswiderstand des elektromotorischen Bechers ist also in

diesem Falle gleich dem Leitungswiderstande eines 4,11 m langen Kupferdrahtes von derselben Dicke, wie der, welchen man zu den Einschaltungen verwendete.

Setzen wir diese Werte von w und E in Gleichnng 2), so wird sie

$$S = \frac{7{,}727}{4{,}11 + r} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 3)$$

Aus dieser Gleichung ergeben sich aber folgende zusammengehörige Werte von r und S

r	S
10	0,547
40	0,175
70	0,104
100	0,074

Diese berechneten Stromstärken sind also in der That so nahe gleich den beobachteten und in der dritten Spalte der obigen Tafel angeführten, daß diese Versuchsreihe eine vollkommene Bestätigung des Ohm'schen Gesetzes liefert.

Bezeichnen wir mit e die elektromotorische Kraft und mit w den wesentlichen Widerstand eines einzelnen Elementes, so ist die elektromotorische Kraft E einer aus n solchen Elementen zusammengesetzten Säule gleich ne, der wesentliche Leitungswiderstand dieser Säule ist aber nw, weil der ganze Strom durch n Elemente hindurchgehen muß. Wird zwischen den Polen dieser Säule ein Widerstand r eingeschaltet, so ist also die Stromstärke

$$S = \frac{ne}{nw + r} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4)$$

Für den Fall, daß der Widerstand r des Schließungsbogens verschwindend klein ist gegen den wesentlichen Leitungswiderstand nw der Säule, reduziert sich Gleichung 4) auf

$$S = \frac{ne}{nw} = \frac{e}{w};$$

eine Säule von n Elementen bringt also in diesem Falle keine größere Wirkung hervor als ein einzelnes Element.

Um die Richtigkeit dieser Folgerung durch den Versuch nachzuweisen, wurde der Reihe nach der Strom eines einzigen und dann der Strom von sechs zur Säule verbundenen Zinkkohlenelementen durch die Tangentenbussole und kurze dicke Zuleitungsdrähte geschlossen, so daß der Leitungswiderstand r des Schließungsbogens, wenn auch nicht Null, doch sehr gering war. Es ergab sich

für das einzelne Element eine Ablenkung von 67°
für die Säule von 6 Elementen eine Ablenkung von 68°.

Man sieht hier in der That, daß durch die Vermehrung der zur Säule verbundenen Elemente die Stromstärke kaum merklich vermehrt wird.

Wenn dagegen der Leitungswiderstand r des Schließungsbogens einen bedeutenden Wert hat, so wächst der Zähler des Bruches 4) bei Vermehrung der Elementenzahl n in rascherem Verhältnis als der Nenner; die Vermehrung der zur Säule verbundenen Elemente muß also in diesem Falle eine Vergrößerung der Stromstärke zur Folge haben, was auch durch folgenden Versuch bestätigt wird.

Zwischen die Pole eines einzigen Zinkkohlenelementes wurde außer der Tangentenbussole noch ein 40 m langer dünner Kupferdraht eingeschaltet; die bei dieser Anordnung beobachtete Ablenkung der Tangentenbussole betrug 11°.

Als nun bei unverändertem Schließungsbogen das eine Zinkkohlenelement durch eine Säule von 6 solchen Zinkkohlenelementen ersetzt wurde, stieg die Ablenkung auf 50°.

In allen Fällen also, in welchen der im Schließungsbogen zu überwindende Leitungswiderstand bedeutend ist, muß eine Säule von vielen Elementen angewendet werden, um eine namhafte Stromstärke zu erhalten.

Nachdem wir untersucht haben, welchen Einfluß unter verschiedenen Umständen die Vermehrung der zur Säule verbundenen Elemente auf die Stromstärke hat, wollen wir nun den Einfluß der Vergrößerung der Polplatten betrachten.

Die Stromstärke, welche ein Element hervorbringt, ist

$$S = \frac{e}{w + r}$$

wenn S, e, w und r die obige Bedeutung haben. Werden unter sonst gleichen Umständen die Polplatten n mal größer gemacht, so hat dies zur Folge, daß der wesentliche Leitungswiderstand des Elektromotors n mal kleiner, also $\frac{w}{n}$ wird, weil ja der Querschnitt der zu durchströmenden Flüssigkeitsschicht n mal größer wird; dagegen bleibt die Spannung in den Polplatten, also auch die elektromotorische Kraft unverändert. Für ein Element mit n mal so großen Polplatten hat man daher:

$$S = \frac{e}{\frac{w}{n} + r}.$$

Diese Gleichung geht über in:

$$S = \frac{ne}{w}$$

wenn r verschwindend klein gegen $\frac{w}{n}$ ist. Bei sehr geringem Leitungswiderstand des Schließungsbogens wird also die Stromstärke durch Vergrößerung der Polplatten vermehrt.

Dieses aus dem Ohm'schen Gesetze gezogene Resultat wird durch folgenden Versuch bestätigt.

Ein einzelnes Zinkkohlenelement, durch kurze dicke Kupferdrähte mit der Tangentenbussole verbunden, gab einen Ausschlag von 43°.

Als aber drei solcher Elemente in der Weise kombiniert wurden, daß einerseits alle drei Zinkplatten, andererseits alle drei Kohlencylinder mit einander verbunden waren, daß also die drei Becher ein einziges Plattenpaar von der dreifachen Oberfläche des einzelnen Bechers darstellten, stieg die Ablenkung auf 67°.

230 **Leitungswiderstand der Metalle.** Daß der Leitungswiderstand eines Metalldrahtes bei gleichem Stoff und gleichem Durchmesser seiner Länge proportional ist, versteht sich von selbst, und wir haben dies im vorigen Paragraphen auch stillschweigend angenommen. Wie sich der Leitungswiderstand der Drähte aber mit ihrer Dicke ändert, muß durch den Versuch ermittelt werden.

Es zeigt sich nun, daß die Stromstärke ungeändert bleibt, wenn man einen im Schließungsbogen befindlichen Draht vom Querschnitte q und der Länge l mit anderen Drähten desselben Metalls vertauscht, deren Querschnitt $2q, 3q \ldots nq$, deren Länge aber $2l, 3l \ldots nl$ ist. Hieraus aber folgt, daß zwei Drähte von demselben Metalle gleiche Leitungswiderstände haben, wenn sich ihre Querschnitte wie ihre Längen verhalten.

Den Widerstand, welchen ein Draht von der Länge 1 und dem Querschnitte 1 dem Durchgang des Stromes entgegensetzt, nennt man specifischen Leitungswiderstand. Bezeichnet man diesen mit s, so ist nach dem soeben Entwickelten der Leitungswiderstand eines Drahtes von der Länge l und dem Querschnitte 1 gleich sl. Ebenso groß ist aber auch der Leitungswiderstand eines Drahtes von der Länge $l.q$ und dem Querschnitte q, da sich die Querschnitte der beiden Drähte wie ihre Längen verhalten. Ist aber der Leitungswiderstand eines Drahtes von der Länge $l.q$ und dem Querschnitte q gleich sl, so ist der Widerstand r eines Drahtes von der Länge l und dem Querschnitte q, da dieser Draht $q$mal so kurz ist:

$$r = s \cdot \frac{l}{q},$$

d. h. man findet den Leitungswiderstand eines Drahtes, wenn man den specifischen Leitungswiderstand mit dem Quotienten aus der Länge durch den Querschnitt des Drahtes multipliziert. Die nachfolgende kleine Tabelle giebt den Wert des specifischen Leitungswiderstandes verschiedener Metalle auf Kupfer und auf Quecksilber bezogen.

Silber	0,847	0,0154
Kupfer.	1,000	0,0182
Messing	3,960	0,0720
Zink	4,713	0,0857
Eisen	6,468	0,1176
Platin	7,227	0,1314
Neusilber	19,398	0,3527
Quecksilber	55,000	1,0000

Zu galvanischen Leitungen wird vorzugsweise Kupferdraht verwendet, weil der specifische Leitungswiderstand dieses Metalles bedeutend geringer ist, als der des Eisens und des Messings.

Als Einheit des elektrischen Leitungswiderstandes nahm man früher den Widerstand eines Kupferdrahtes von 1 m Länge und 1 mm Durchmesser. Es zeigte sich aber bald, daß der Leitungswiderstand verschiedener Kupferdrähte bei gleichen Dimensionen doch oft sehr verschieden ist, was daher rührt, daß schon die geringste Verunreinigung durch fremde Metalle bedeutende Änderungen in der Leitungsfähigkeit der Drähte veranlaßt. Nach Siemens bezieht man deshalb jetzt die Leitungswiderstände auf Quecksilber, weil dieses Metall in flüssigem Zustande stets in gehöriger Reinheit zu haben ist. Als Einheit des Leitungswiderstandes nimmt man demnach jetzt den einer Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt.

Leitungswiderstand der Flüssigkeiten. Die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten ist bedeutend geringer, ihr Leitungswiderstand also bedeutend größer als der der Metalle. So ist z. B. der Leitungswiderstand einer Säule von gesättigter Kochsalzlösung 3 Millionen mal größer als der Leitungswiderstand eines Kupferstabes von gleicher Länge und gleicher Dicke. Wenn man in diesem Sinne den Leitungswiderstand des Kupfers zur Einheit nimmt, so ist der Leitungswiderstand einer gesättigten Lösung von 231

Kupfervitriol	18 000 000
Zinkvitriol	17 000 000
Kochsolz	3 000 000
Es ist ferner der Leitungswiderstand der käuflichen Salpetersäure	1 600 000
der verdünnten Schwefelsäure (1 Vol. Vitriolöl auf 12 Vol. Wasser) . .	1 130 000

Wenn man den Strom einer galvanischen Säule durch eine Flüssigkeit hindurchleitet, so erleidet die Stromstärke eine doppelte Schwächung, einmal weil der bedeutende Leitungswiderstand der Flüssigkeit zu überwinden ist, dann aber noch, weil eine bedeutende Schwächung der elektromotorischen Kraft stattfindet und zwar infolge der galvanischen Polarisation, die wir bereits in §. 224 und 226 kennen lernten.

232 **Vergleichung verschiedener Rheomotoren.** Um den Effekt verschiedener Volta'scher Säulen beurteilen zu können, muß deren elektromotorische Kraft und innerer Leitungswiderstand bekannt sein; diese lassen sich aber nach dem Ohm'schen Gesetze sehr einfach bestimmen; es reichen dazu zwei Messungen der Stromstärke hin, nämlich die eine bei Anwendung eines Schließungsbogens von verschwindend kleinem Widerstand, die andere nach Einschaltung eines Drahtes von bekanntem Leitungswiderstande.

Um solche Bestimmungen vergleichbar zu machen, muß man eine bestimmte Einheit des Leitungswiderstandes und der Stromstärke zu Grunde legen. — Als Einheit des Leitungswiderstandes nimmt man am zweckmäßigsten die in §. 230 definierte Siemens'sche Quecksilbereinheit. Als Einheit der Stromstärke aber nimmt man meistens einen Strom an, welcher, durch ein Voltameter gehend, in einer Minute 1 cbcm Knallgas liefert.

In der Regel mißt man die Stromstärke freilich nicht mit dem Voltameter, sondern mit der Tangentenbussole; es ist aber leicht, die Angaben jeder Tangentenbussole auf die des Voltameters zu reduzieren; man lasse nur einen Strom gleichzeitig durch ein Voltameter und die Tangentenbussole gehen, beobachte die Ablenkung letzterer und die Menge des in einer Minute entwickelten Knallgases, so ergiebt sich aus einer solchen Beobachtung, mit welcher Zahl man die Tangente des Ablenkungswinkels multiplizieren muß, um die entsprechende Knallgasmenge (in Kubikcentimetern ausgedrückt) zu erhalten. Diese Zahl wird der Reduktionsfaktor genannt.

Um den Reduktionsfaktor genau zu erhalten, wird man sich freilich nicht mit einer einzigen Vergleichung der Art begnügen, sondern man wird mehrere anstellen und aus ihnen das Mittel nehmen.

Diese Einheiten zu Grunde legend fand man z. B., daß ein Bunsen'sches Element, nur durch eine Tangentenbussole geschlossen, deren Reduktionsfaktor 73,4 war, eine Ablenkung von 26° bewirkte; die Stromstärke war also

$$73{,}4 \,.\, tang\, 26^0 = 73{,}4 \,.\, 0{,}488 = 35{,}7; \text{ es ist also:}$$

$$\frac{E}{w} = 35{,}7, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

wenn wir mit E die elektromotorische Kraft, mit w den wesentlichen Leitungswiderstand des Elementes bezeichnen.

Nach Einschaltung einer Drahtspirale, deren Leitungswiderstand genau der Siemens'schen Quecksilbereinheit gleich war, sank die Ablenkung auf 10,25°, die Stromstärke also auf 13,3; es ist also:

$$\frac{E}{w+1} = 13{,}3; \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 2)$$

aus der Kombination der beiden Gleichungen 1) und 2 ergiebt sich:

$$w = 0{,}594, \qquad E = 21.$$

Nach der gleichen Methode ergab sich der Wert der elektromotorischen Kraft E

für einen Grove'schen Becher 20,5
„ „ Daniell'schen Becher 12,0
„ ein Wollaston'sches Plattenpaar . . 5,5

Die Differenz der elektromotorischen Kraft der Wollaston'schen und der Daniell'schen Kette hat ihren Grund lediglich darin, daß die elektromotorische Kraft der ersteren durch die galvanische Polarisation geschwächt ist, welche bei der Daniell'schen Kette dadurch, daß das Kupfer in einer Lösung von Kupfervitriol steht, vermieden wird.

Die größere elektromotorische Kraft der Grove'schen und der Bunsen'schen Becher rührt daher, daß die Kohle sowohl wie das Platin in Berührung mit Salpetersäure positiv elektrisch werden, daß also die elektrische Differenz zwischen der positiv erregten Kohlen- oder Platinplatte und der negativ erregten Zinkplatte eine größere sein muß, als die Differenz zwischen der letzteren und der durch die Flüssigkeit gleichfalls negativ erregten Kupferplatte.

Die Größe der Plattenpaare hat keinen Einfluß auf die Größe der elektromotorischen Kraft, wohl aber auf die Größe des wesentlichen Leitungswiderstandes, welcher durch Vergrößerung der Plattenpaare vermindert wird.

Auch der Konzentrationsgrad der Flüssigkeiten in den rheomotorischen Bechern hat keinen oder doch nur einen unbedeutenden Einfluß auf die elektromotorische Kraft der Säule, während der wesentliche Leitungswiderstand von demselben sehr abhängig ist. Je weniger konzentriert die Salpetersäure ist, in welcher die Kohle oder das Platin stehen, je stärker verdünnt die Schwefelsäure ist, in welcher das Zink steht, desto größer wird der wesentliche Leitungswiderstand. — Wenn eine Säule von konstanten Bechern eine Zeitlang geschlossen bleibt, so nimmt die Stromstärke ab, nicht etwa, weil die elektromotorische Kraft gering geworden wäre, sondern weil an die Stelle der verdünnten Schwefelsäure nun teilweise eine weit schlechter leitende Lösung von Zinkvitriol getreten ist.

Die bedeutende Überlegenheit Bunsen'scher und Grove'scher Becher über gleich große Daniell'sche liegt nicht allein in der größeren elektromotorischen Kraft der ersteren, sondern auch darin, daß der wesentliche Widerstand derselben geringer ist als der der Daniell'schen Becher; es rührt dies daher, daß konzentrierte Salpetersäure ein weit besserer Elektricitätsleiter ist, als eine Lösung von Kupfervitriol.

Auch die Natur der Thonzellen übt einen bedeutenden Einfluß auf den wesentlichen Leitungswiderstand elektromotorischer Becher aus.

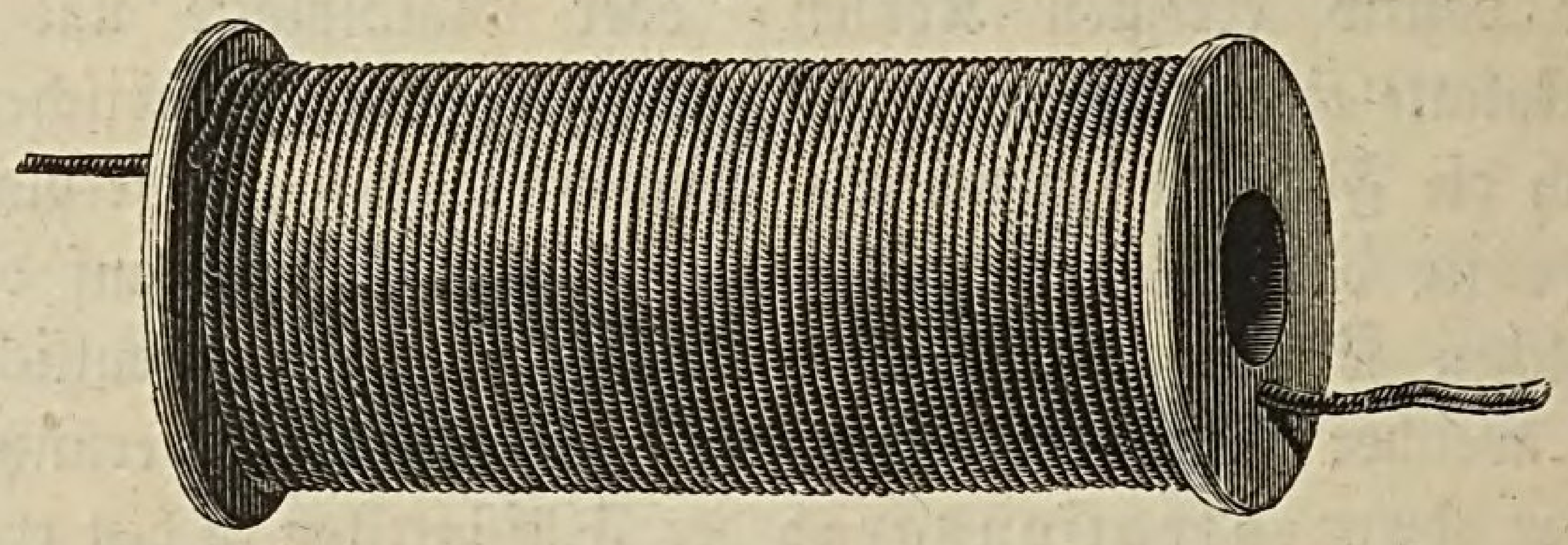
Magnetisierung durch den galvanischen Strom. Nachdem wir die Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom und die 233
darauf gegründeten Apparate zur Messung des galvanischen Stromes kennen gelernt hatten, benutzten wir dieselben, um die wichtigsten Gesetze der Stromstärke zu ermitteln. Wir kehren jetzt zur Betrachtung der magnetisierenden Wirkungen des Stromes zurück.

Der elektrische Strom wirkt nicht allein richtend auf den freien Magnetismus, sondern er wirkt auch magnetisierend auf weiches Eisen und Stahl, was

sich schon dadurch zeigt, daß ein von einem kräftigen Strome durchflossener Leitungsdraht Eisenfeile anzieht. — Um einen Eisenstab zu magnetisieren, muß man den Strom mehrfach um denselben herumführen, indem man den mit Seide oder Wolle übersponnenen Leitungsdraht spiralförmig um das Eisen herumwindet. Statt die Drahtwindungen direkt auf dem Eisen anzubringen, ist es aber zweckmäßiger, den Draht auf eine Spule von Holz oder Pappe aufzuwinden und den zu magnetisierenden Eisenstab in die Höhlung derselben hineinzuschieben, weil man alsdann die Spirale auch zu Induktionsversuchen verwenden kann.

Fig. 459 stellt eine solche Magnetisierungsspirale dar. Man hat deren von sehr verschiedenen Größen und Drahtdimensionen. Für sehr kräftige Wir-

Fig. 459.



kungen werden Magnetisierungsspiralen angewandt, welche aus 800 bis 1000 Windungen eines $1/_2$ bis 1 Linie dicken Kupferdrahtes bestehen, die natürlich in mehreren Lagen übereinander liegen.

Schiebt man nun einen Eisenstab in eine Magnetisierungsspirale hinein, so wird er zu einem Magnete, sobald ein elektrischer Strom die Spirale durchläuft. Ein solcher Magnet wird Elektromagnet genannt. Ragen die Enden des Eisenstabes aus der Spirale hervor, so kann man Eisenstücke an dieselben anhängen, welche aber sogleich wieder abfallen, sobald der Strom unterbrochen wird, welcher den Draht durchläuft. Ein Elektromagnet bleibt also nur so lange magnetisch, als er dem magnetisierenden Einflusse des Stromes ausgesetzt ist und wird deshalb auch als temporärer Magnet bezeichnet.

Was die Polarität der beiden Enden des Elektromagnets betrifft, so ist dieselbe nach den Bemerkungen auf Seite 425 leicht zu bestimmen; dasjenige Ende, welches, dem Beobachter zugewandt, vom Strome in demselben Sinne umkreist wird, in welchem sich der Zeiger einer Uhr dreht, ist der Südpol; dasjenige Ende dagegen, welches, in gleicher Weise betrachtet, vom Strome im entgegengesetzten Sinne der Drehung eines Uhrzeigers umkreist wird, ist der Nordpol des Elektromagnets.

Fig. 460.



Fig. 460 dient zur Erläuterung des Gesetzes der Polarität.

Wie den Stahlmagneten, so giebt man auch den Elektromagneten eine U-förmige Gestalt, Fig. 461, wenn man eine große Tragkraft erzielen will. Es versteht sich von selbst, daß die beiden Schenkel eines solchen Elektromagnets in ent-

gegengesetztem Sinne umströmt werden müssen, damit der eine mit einem Nordpol, der andere mit einem Südpol endet.

Für manche Versuche, namentlich für die diamagnetischen, die wir weiter unten werden kennen lernen, ist es wünschenswert, daß die beiden Pole des

Fig. 461.

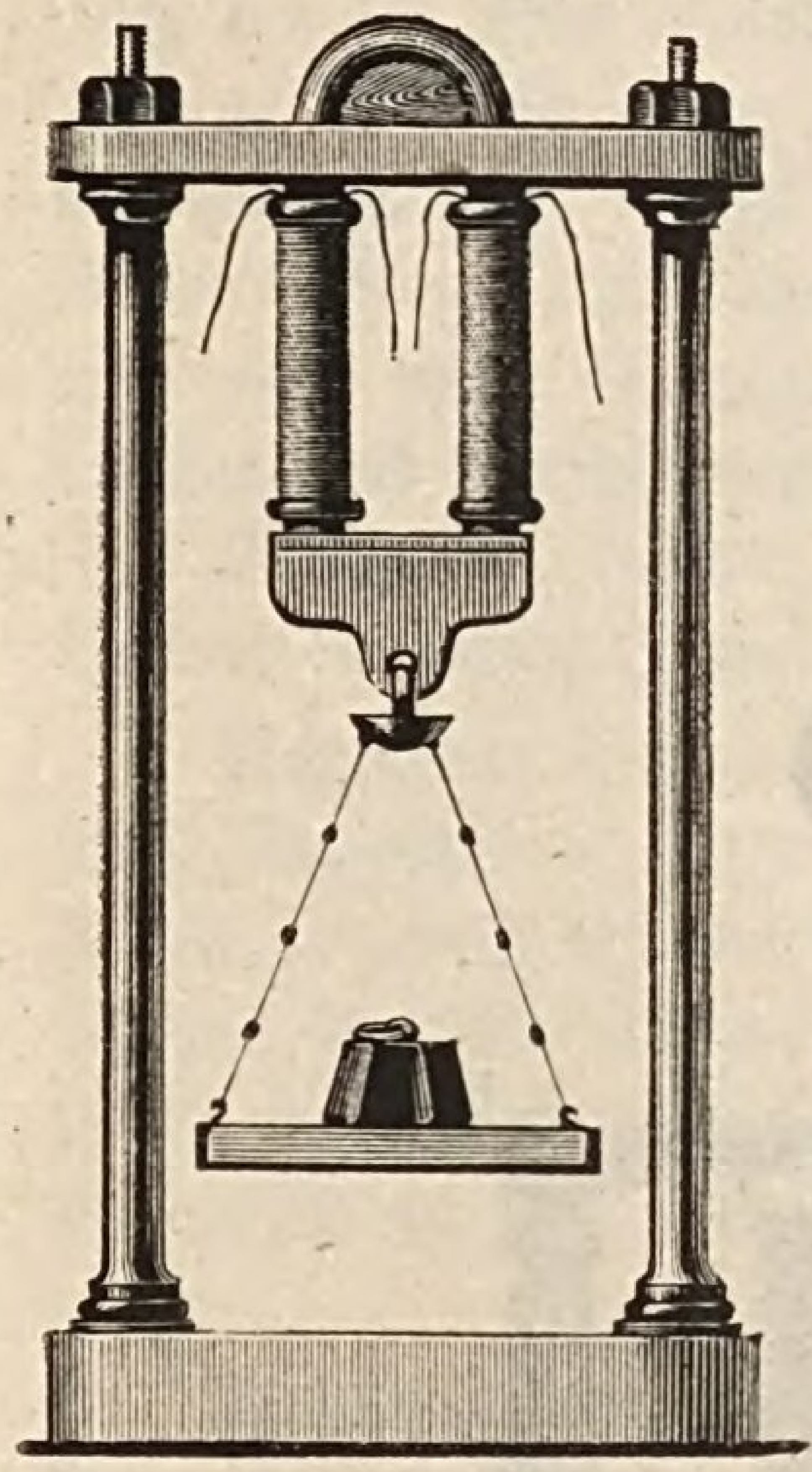


Fig. 462.

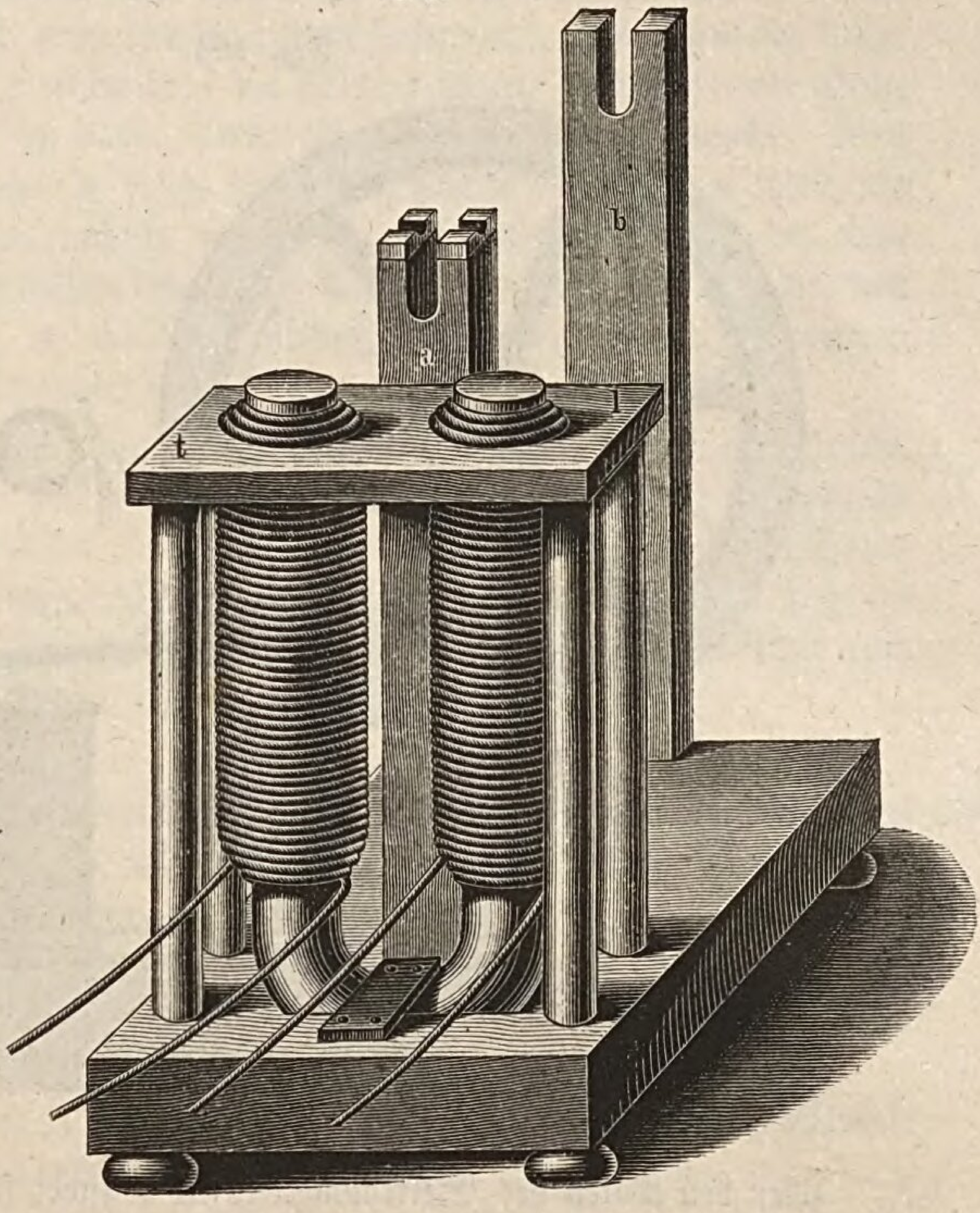
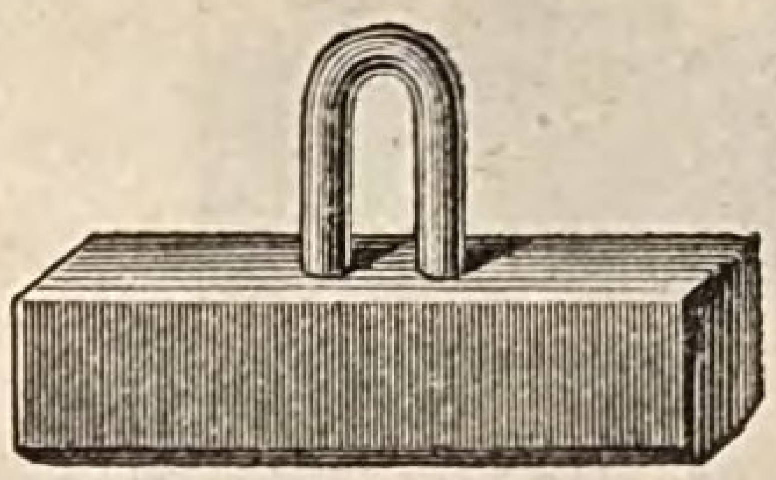


Fig. 463.



Elektromagnets nach oben gerichtet sind. Eine für diese Zwecke geeignete Aufstellung des Elektromagnets ist Fig. 462 ungefähr in $^1/_5$ der natürlichen Größe dargestellt.

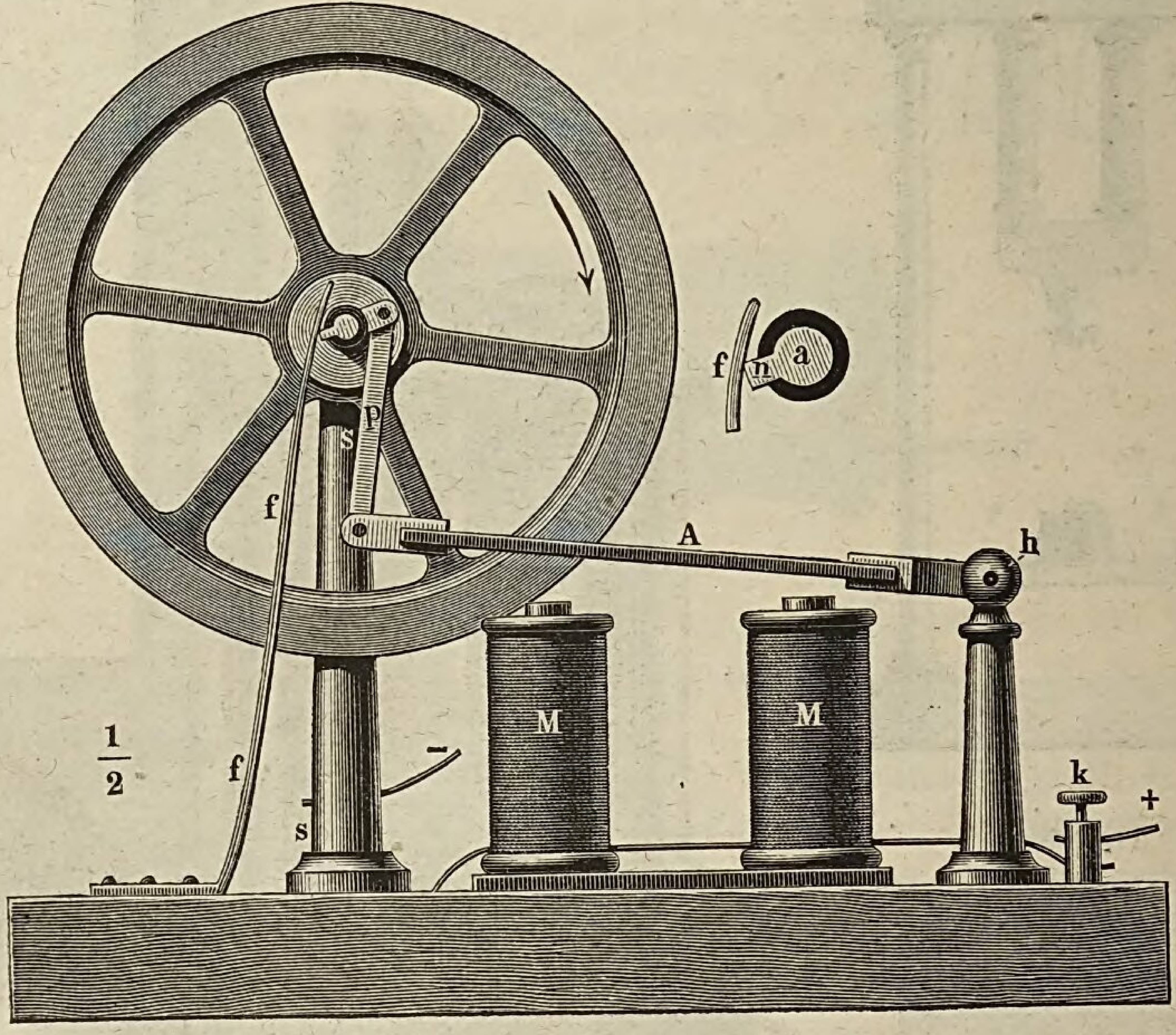
Um die Tragkraft solcher Elektromagnete zu prüfen, setzt man auf die Pole einen Anker von der Form Fig. 463; in das Öhr desselben wird ein eiserner Hebel eingesetzt, dessen Stützpunkt auf der Säule *a* ruht; am anderen Ende des Hebels werden entsprechende Gewichte angehängt. Die Säule *b* dient dazu, den Hebel aufzuhalten, wenn der Anker abgerissen wird.

Der Elektromagnetismus liefert ein treffliches Mittel, Stahlnadeln oder Stahlstäbe zu magnetisieren; man braucht sie nur einige Male in einer von einem starken Strome durchflossenen kurzen und dicken Magnetisierungsspirale hin und her zu schieben. Zur Magnetisierung sehr harter Stahlstäbe zeigt sich jedoch das Streichen auf den Polen eines Elektromagnets weit wirksamer.

234 **Elektromagnetische Motoren.** Die kräftigen magnetischen Wirkungen, welche der elektrische Strom hervorzubringen im Stande ist, führten auf die Idee, denselben als bewegende Kraft zu benutzen.

Man hat diesen Zweck auf sehr verschiedene Weise zu erreichen gesucht; einer der einfachsten hierher gehörigen Apparate ist in Fig. 464 dargestellt.

Fig. 464.



Über den Polen des Elektromagnets *M* befindet sich die eiserne, als Anker dienende Platte *A*, welche einen Hebel bildet, dessen Drehpunkt *h* ist. Das andere Ende dieses Hebels ist mittelst der Gelenkstange *p* an einer kleinen Kurbel eingehängt. Die Axe dieser Kurbel dreht sich in zwei Zapfenlagern, welche von Messingsäulchen getragen werden, von denen unsere Figur nur das hintere, *s*, zeigt. Die vordere ganz gleiche Säule ist in der Zeichnung weggelassen worden, weil sie wesentliche Teile des Apparats verdeckt haben würde. Wenn bei der Kurbelstellung, wie sie in der Figur dargestellt ist, der Anker *A* niedergezogen wird, so muß sich die Kurbel und das auf ihrer Axe befestigte Schwungrad in der Richtung des Pfeiles drehen.

Bei der in Fig. 464 gezeichneten Stellung der Kurbel geht nun aber der Strom eines Bunsen'schen Bechers, dessen Poldrähte in *k* und im unteren Ende von *s* eingeschraubt sind, in folgender Weise durch den Apparat. Von *k* aus tritt er in die Umwindungen des Elektromagnets *M*, von diesen wird er zu der Messingfeder *f* geführt, und gelangt durch die metallene Nase *n*, welche die entgegengesetzte Richtung der Kurbel hat, zu der metallenen Dreh-

axe, von wo er über s zum elektromotorischen Becher zurückkehrt. Bei dieser Stellung der Kurbel ist also der Elektromagnet M in Thätigkeit gesetzt, er zieht den Anker nieder und bewirkt dadurch die Umdrehung der Axe in der angegebenen Richtung.

Infolge dieser Rotation aber kommt alsbald die Nase n außer Berührung mit der Feder f und zwar gerade in dem Zeitpunkte, in welchem der Anker A seine tiefste Stellung erreicht hat; die Feder f schleift nun auf einer Hülse von Horngummi, welche an dieser Stelle die metallene Axe a umgiebt. Nun ist der Strom unterbrochen, M besitzt keinen Magnetismus mehr, A wird also auch nicht mehr angezogen und so kann dann die Rotation infolge der dem Schwungrad bereits mitgeteilten lebendigen Kraft fortdauern, bis n wieder mit f in Berührung kommt, A abermals niedergezogen und so dem rotierenden System ein neuer Impuls erteilt wird.

Schon der Strom eines einzigen Bunsen'schen Bechers ist im Stande, solche Apparate in rasche Rotation zu versetzen, die dabei geleistete mechanische Arbeit ist jedoch verschwindend klein. Freilich ist es gelungen, in mancherlei anderen Formen elektromagnetische Motoren zu konstruieren, welche mehr zu leisten im Stande sind, immerhin aber bleiben ihre Effekte im Verhältnis zum Verbrauch an Zink und Säure sehr gering.

Elektrische Telegraphen. Praktisch sind bis jetzt nur diejenigen 235
Anwendungen des galvanischen Stromes geworden, zu welchen eine geringe Stromstärke hinreicht, und dahin gehört vorzugsweise die elektrische Telegraphie, welche sich darauf gründet, daß sich der galvanische Strom in Leitungsdrähten mit fast momentaner Geschwindigkeit (mindestens 3300 geographische Meilen in der Sekunde) verbreitet.

Unter den verschiedenen Apparaten, die man zu diesem Zwecke konstruiert hat, ist Morse's Drucktelegraph der einfachste.

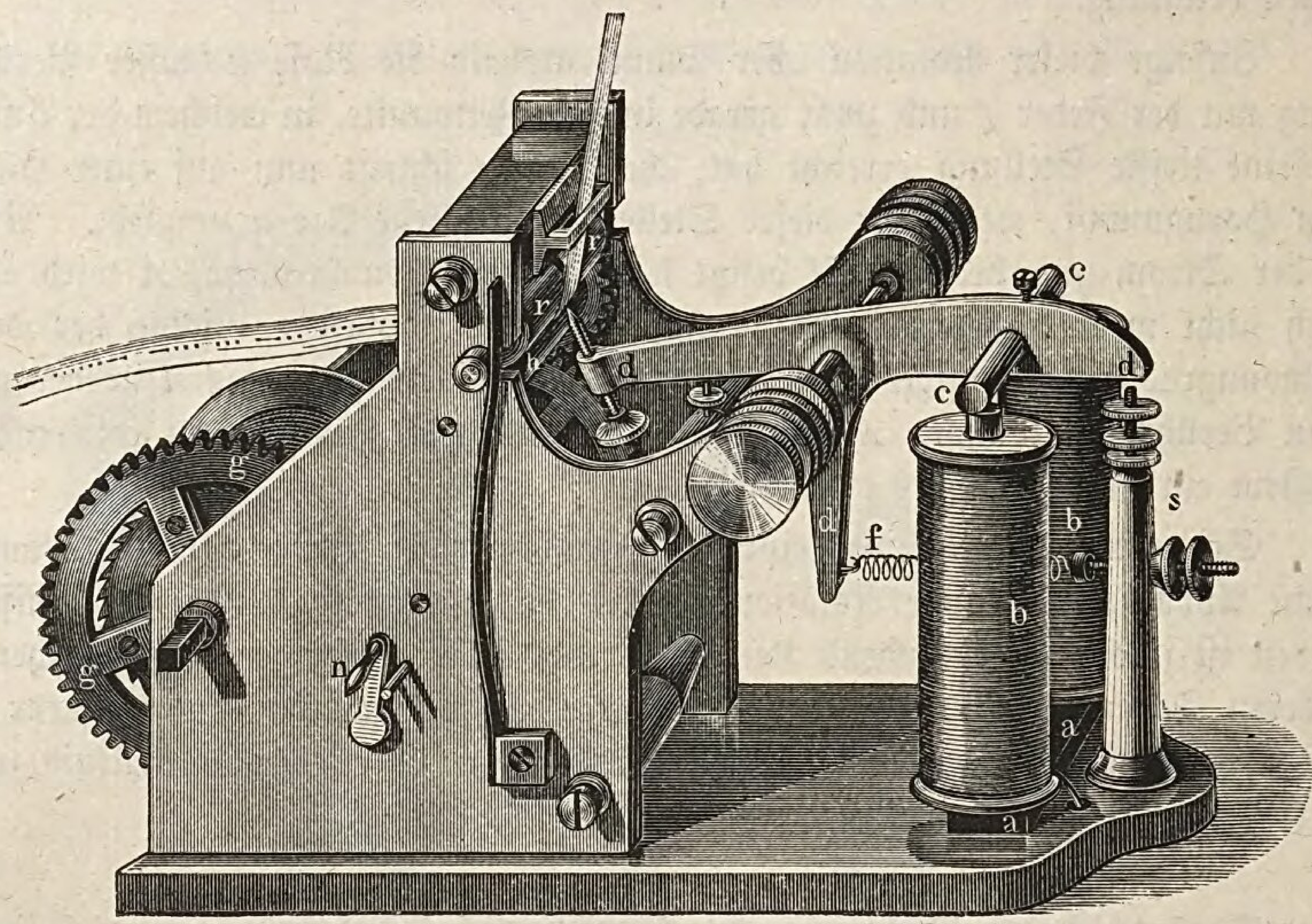
Fig. 465 (a. f. S.) stellt den Morse'schen Schreibapparat in $1/3$ der natürlichen Größe dar. Auf einer eisernen Platte a sind zwei Eisenkerne befestigt, welche, mit den Magnetisierungsspiralen b umgeben, einen Elektromagnet bilden. Über den Polen schwebt in einiger Entfernung der Anker c, welcher in dem Messinghebel dd steckt. Sobald die Eisenkerne magnetisch werden, wird das rechte Ende des Hebels d niedergezogen; wenn die Eisenkerne ihren Magnetismus verlieren, so wird der Hebel d durch die an einem Seitenarme ziehende Feder f in seine alte Stellung zurückgebracht.

Der Hebelarm d schlägt mit seinem rechten Ende auf der Säule s schon auf, bevor noch der Anker c vollständig in Berührung mit den Polen des Elektromagnets gekommen ist, weil bei vollkommen anliegendem Anker der Elektromagnet nach Unterbrechung des Stromes seinen Magnetismus nicht ganz verlieren und dadurch der Gang des Apparates sehr erschwert und unsicher gemacht würde.

An seinem linken Ende trägt der Hebel d einen Stahlstift, welcher bei

jedem Niedergange des Ankers *c* gegen einen Papierstreifen gedrückt wird, den ein Uhrwerk mit gleichmäßiger Geschwindigkeit fortzieht.

Fig. 465.



Das erste Rad *g* dieses Uhrwerks wird durch eine Feder oder durch ein Gewicht langsam umgedreht, und diese Bewegung wird durch mehrere Zwischenräder auf die Walze *h* übertragen, welche sich mit größerer Geschwindigkeit umdreht. Die Umdrehung der Walze *h* bewirkt durch die Reibung die Umdrehung der gleich großen Walze *r*. Zwischen beiden steckt ein Papierstreifen, welcher von einer über dem Apparate befestigten Rolle kommt. Ist das Uhrwerk im Gange, so wird der Papierstreifen mit gleichförmiger Geschwindigkeit, ungefähr 2 cm weit in der Sekunde, fortgezogen.

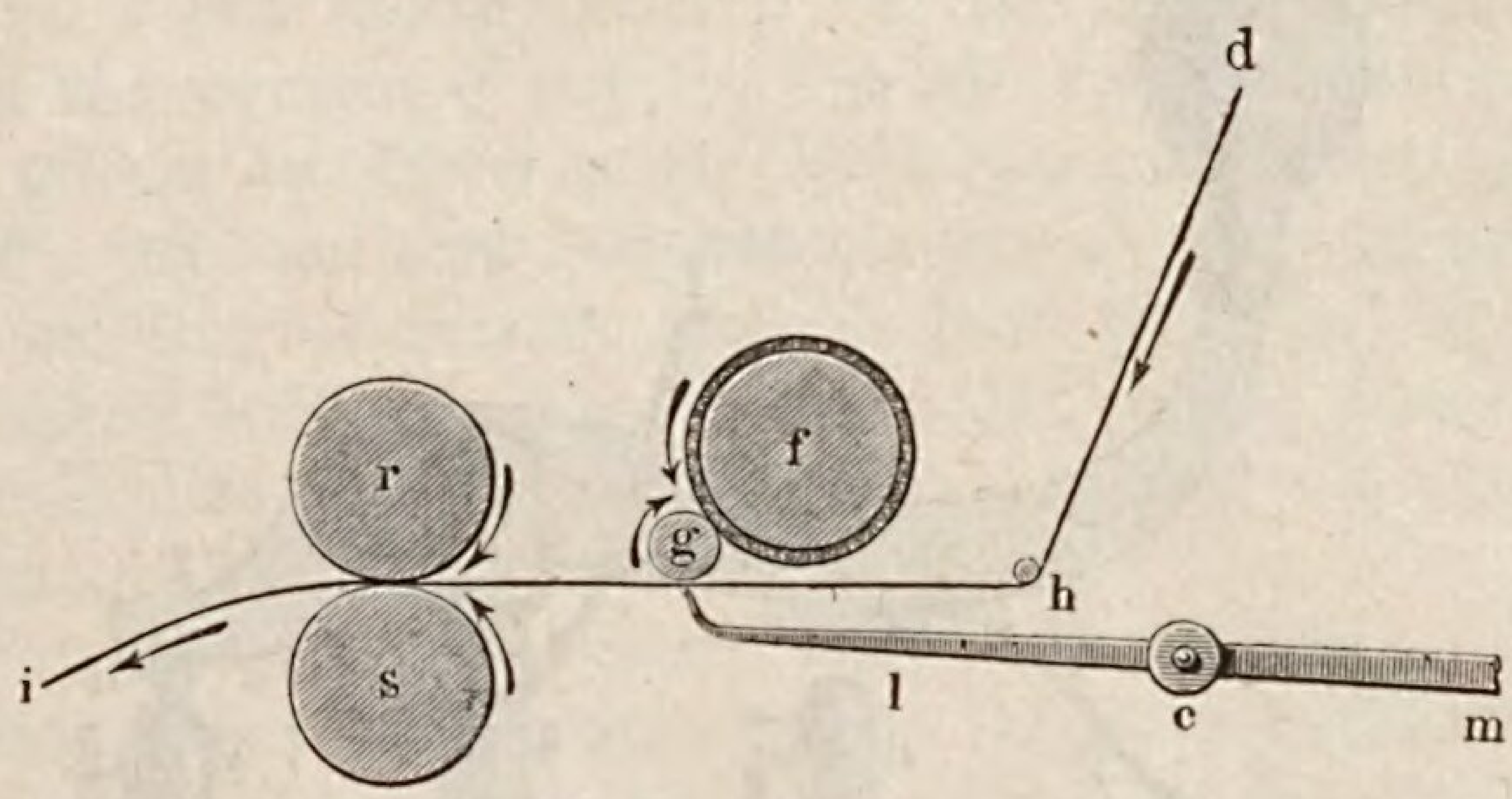
In der Mitte der Rolle *r* befindet sich eine ringförmige, teilweise in unserer Figur sichtbare Rinne. In diese Rinne wird nun der Stift hineingedrückt, wenn *c* niedergezogen wird; es preßt also der Stift eine Vertiefung in den die Rinne überdeckenden Papierstreifen. Wird der galvanische Strom nur für einen Augenblick geschlossen, so drückt der Stift einen Punkt in das Papier; dauert aber die Schließung etwas länger, so entsteht ein Strich, weil ja das Papier unterdessen fortgezogen wird. Aus Punkten und Strichen ist nun das telegraphische Alphabet zusammengesetzt, und zwar das bei uns übliche folgendermaßen:

a · —	f · · — ·	l · — · ·	q — — · —	v · · · —
b — · · ·	g — — ·	m — —	r · — ·	w · — —
c — · — ·	h · · · ·	n — ·	s · · ·	x — · · —
d — · ·	i · ·	o — — —	t —	y — · — —
e ·	k — · —	p · — — ·	u · · —	z — — · ·

Ähnliche Zeichen hat man für die Ziffern, die Interpunktion und den Dienst.

Eine wesentliche Verbesserung des Morse'schen Apparates ist der Farbschreiber, dessen Einrichtung aus Fig. 466 zu ersehen ist. Derselbe unter-

Fig. 466.



scheidet sich von dem Morse'schen Stiftschreiber dadurch, daß das Ende *l* des Schreibhebels *lm* in eine Schneide ausläuft, auf welcher der zwischen den beiden Walzen *r* und *s* hindurchlaufende und schwach gespannte Papierstreifen *dhi* aufliegt. Über dieser Schneide befindet sich ein kleines Röllchen *g*, welches an einer mit dem Räderwerk verbundenen Walze *f* anliegt und mit dieser umgedreht wird. Der Mantel dieser Walze ist mit Tuch belegt und wird von Zeit zu Zeit mit Stempelfarbe versehen, die sich dem Rande des Röllchens *g* mitteilt. — Wird nun der Strom durch die Drahtwindungen des Elektromagnets geleitet, so zieht dieser den Anker an und drückt den Papierstreifen gegen den Rand des Fallröllchens, wodurch auf jenem ein farbiger Punkt oder ein farbiger Strich entsteht, je nachdem der Strom nur einen Augenblick, oder etwas länger geschlossen bleibt.

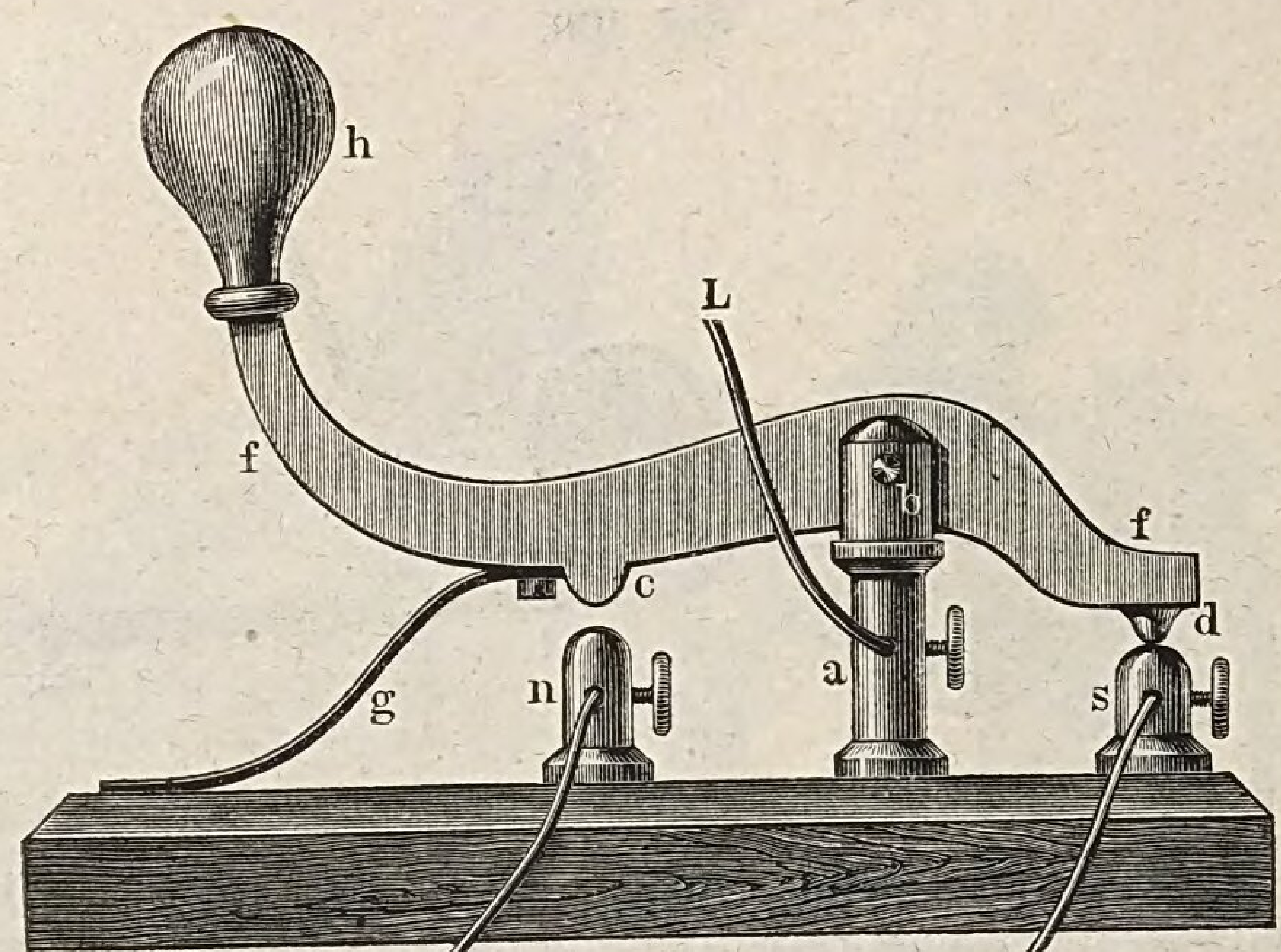
Der Farbschreiber hat dem Morse'schen Stiftschreiber gegenüber den Vorteil, daß seine Schrift leichter gelesen werden kann und zur Bewegung des Schreibhebels ein weit geringerer Kraftaufwand erforderlich ist, so daß auch schon schwächere Ströme zum Telegraphieren hinreichen.

Zum sicheren Schließen und Unterbrechen des Stromes dient ein Apparat, welcher den Namen des Schlüssels führt. Der Schlüssel des Morse'schen Apparates ist Fig. 467 (a. f. S.) in $^1/_2$ der natürlichen Größe abgebildet. Auf einem Brettchen ist ein Messingsäulchen *a* aufgesetzt, in welchem die horizontale stählerne Drehungsaxe des messingenen Hebels *f* befestigt ist. Dieser Hebel wird durch eine Stahlfeder *g* aufwärts gedrückt, so daß die Messingwarze *d* auf dem Messingsäulchen *s* steht. Drückt man den Hebel mittels des Handgriffs *h* nieder, so kommt die Hervorragung *c* des Hebels *f* mit dem Messingsäulchen *n* in Berührung, während die vordere Spitze des Hebels nun in die Höhe gehoben ist, also nicht mehr mit dem Säulchen *s* in leitender Verbindung steht.

Das Messingsäulchen *a* ist durch den Draht *L* mit einem Galvanometer und der Drahtleitung in Verbindung gesetzt, welche zur nächsten Station führt.

Von *n* führt eine Leitung *K* zu dem einen, etwa dem positiven Pol der galvanischen Batterie; von s dagegen geht eine Leitung *E* zunächst nach den

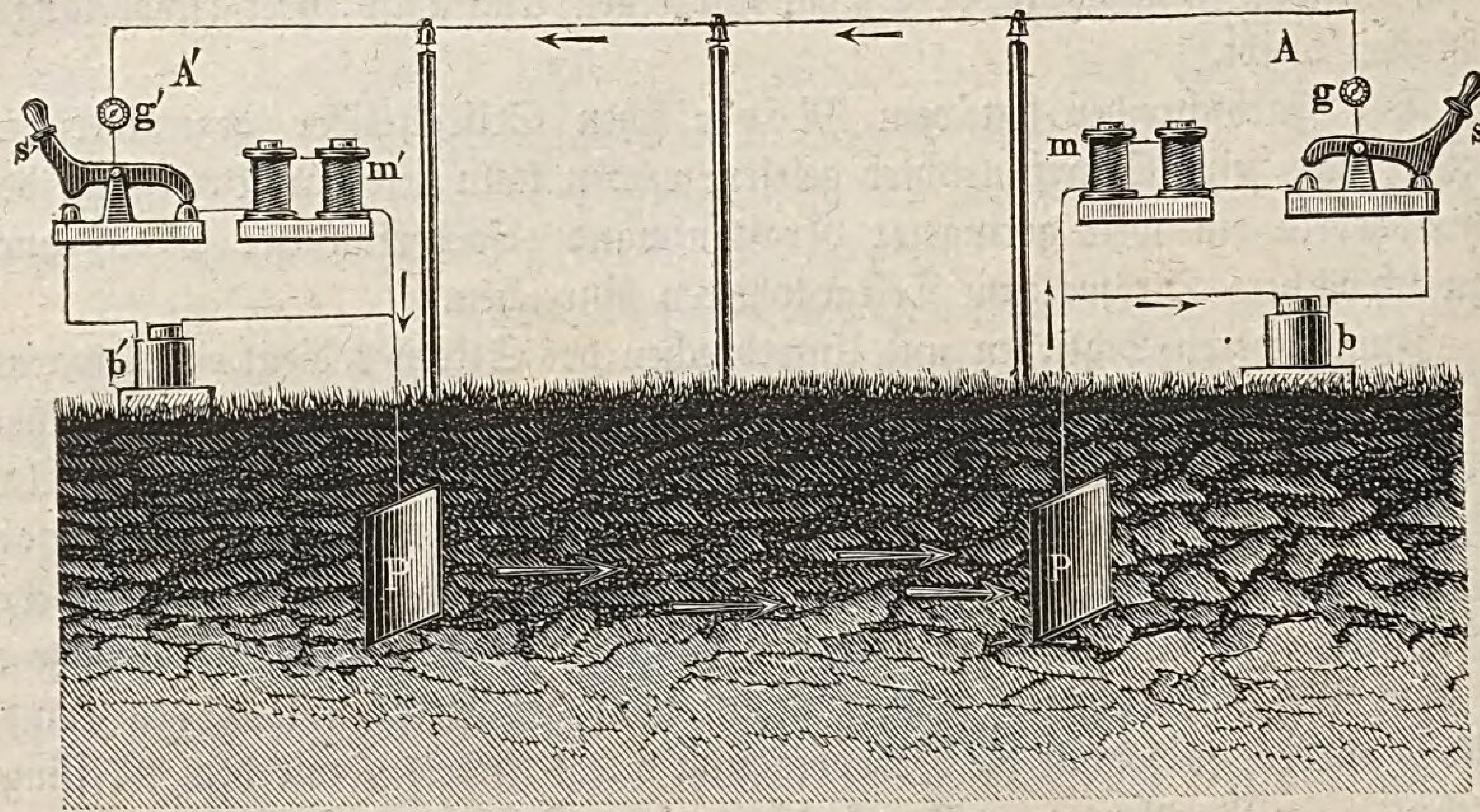
Fig. 467.



Windungen des Elektromagnets und verzweigt sich alsdann so, daß der eine Teil zum negativen Pol der Batterie, der andere aber zu einer in den feuchten Boden vergrabenen Kupferplatte, der sogenannten Erdplatte, führt.

Fig. 468 stellt zwei mit einander verbundene Stationen *A* und *A'* dar; *b* und *b'* sind die Batterieen, s und s' die Schlüssel, *m* und *m'* die Elektro-

Fig. 468.



magnete des Schreibapparates, *g* und *g'* die Galvanometer und *P* und *P'* die Erdplatten.

Sind beide Schlüssel in der Ruhelage, wie es in unserer Figur bei dem Schlüssel der Station links der Fall ist, so kann kein Strom entstehen, denn

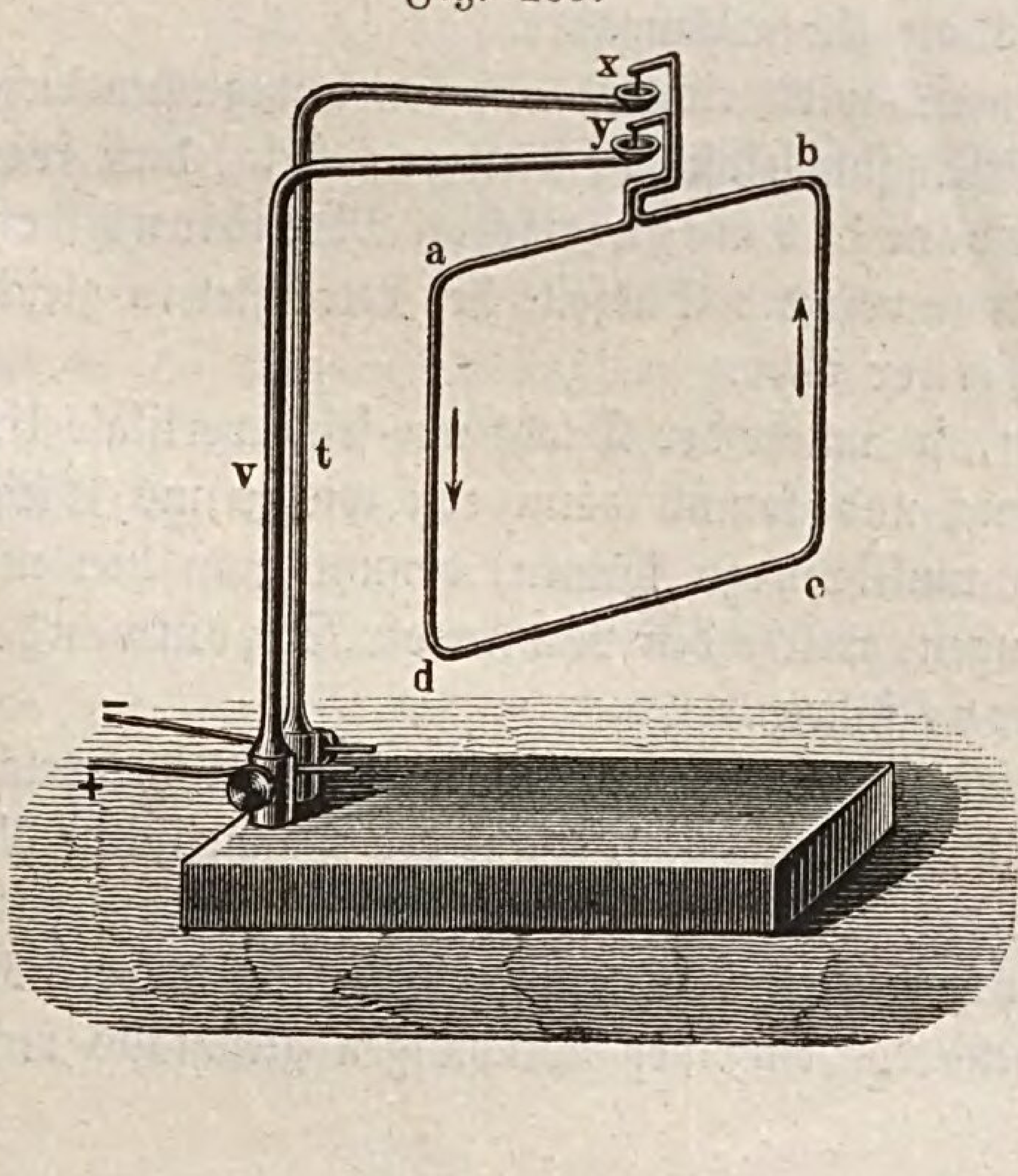
bei dem Messingsäulchen n (siehe Fig. 467) ist die Leitung unterbrochen. Wird aber der Schlüssel auf einer Station niedergedrückt, wie es in unserer Figur für die Station rechts der Fall ist, so ist die Leitung für die Batterie dieser Station hergestellt; der Strom geht vom positiven Pol der Batterie b durch den Schlüssel s zum Galvanometer g und dem Leitungsdraht, welcher den Strom zum Galvanometer g' und dem Schlüssel s' der anderen Station führt; von diesem gelangt der Strom zu den Windungen des Elektromagnets m', zur Erdplatte P', geht dann durch den Erdboden über P zum negativen Pol von b zurück, wie der Lauf des Stromes durch die Pfeile hinlänglich bezeichnet ist.

So umkreist denn der auf der Station rechts erzeugte Strom den Elektromagnet der Station links; die Batterie b' dieser Station ist nicht geschlossen, kann also keinen Strom aussenden.

Will der Telegraphist der einen Station, etwa der rechten, eine Depesche abgehen lassen, so giebt er durch Niederdrücken des Tasterhebels das Anrufzeichen (— · — · — · —). Dabei beobachtet er die Nadel des Galvanoskops und erkennt an ihrer Bewegung, oder an ihrer Ruhe, ob die Leitung nach der anderen Station hergestellt, oder unterbrochen ist. Im erstern Falle wiederholt der Schreibhebel an der Empfangstation das Anrufzeichen, wodurch der Telegraphist daselbst aufmerksam gemacht wird, der nun, wenn er das Telegramm nicht annehmen kann, mit dem Wartezeichen (· — · · ·) antwortet, im Falle der Annahme aber das Zeichen zum Beginne des Telegraphierens (— · · · —·) giebt und das Räderwerk auslöst. Der Papierstreifen, der sich jetzt in Bewegung setzt, nimmt das Telegramm auf, dessen Ende durch das Schlußzeichen (· — · — ·) angezeigt wird.

Richtung der Ströme durch Magnete. Die Wirkung zwischen Magneten und elektrischen Strömen ist natürlich eine durchaus gegenseitige. 236

Fig. 469.



Sowie der Strom in festen Leitungsdrähten ablenkend und richtend auf eine bewegliche Magnetnadel wirkt, so muß auch ein fester Magnetstab ablenkend und richtend auf einen durchströmten Leitungsdraht wirken, welcher auf irgend eine Weise leicht beweglich aufgehängt ist.

Ampère hat diesen Satz durch den in Fig. 469 dargestellten Apparat nachgewiesen. Zwei vertikale Säulen von Messing, welche auf einem Fuße von Holz befestigt sind, tragen oben horizontale Arme,

die mit den Quecksilbernäpfchen x und y endigen, deren Mittelpunkte genau vertikal unter einander stehen. Die beiden Säulen sind nirgends in leitender Berührung. Unten sind sie etwas dicker, so daß man die zu den Polen eines galvanischen Rheomotors führenden Leitungsdrähte einschrauben kann; dadurch wird das eine Quecksilbernäpfchen gewissermaßen zum positiven, das andere zum negativen Pole.

In diese Quecksilbernäpfchen wird nun ein Leitungsdraht eingehängt, welcher zum Rechteck gebogen ist, wie Fig. 469, oder auch kreisförmig, wie Fig. 470. Da, wo sich die beiden Drahtenden zu berühren scheinen, sind sie durch eine isolierende Substanz getrennt; sie sind oben umgebogen und mit Stahlspitzen versehen, die in die Näpfchen x und y, Fig. 469, eingetaucht werden. Die eine Spitze geht bis auf den Boden des Näpfchens und ruht hier auf einer kleinen Glasplatte, die andere Spitze taucht nur in das Quecksilber ein. Durch diese Aufhängung ist der Draht ziemlich leicht beweglich.

Fig. 470.

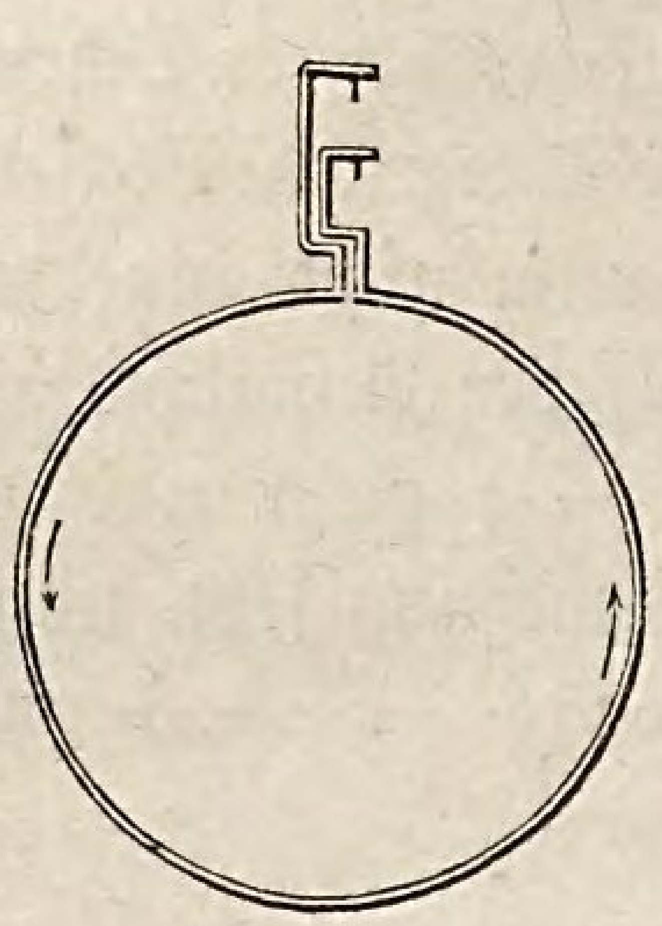


Fig. 471.

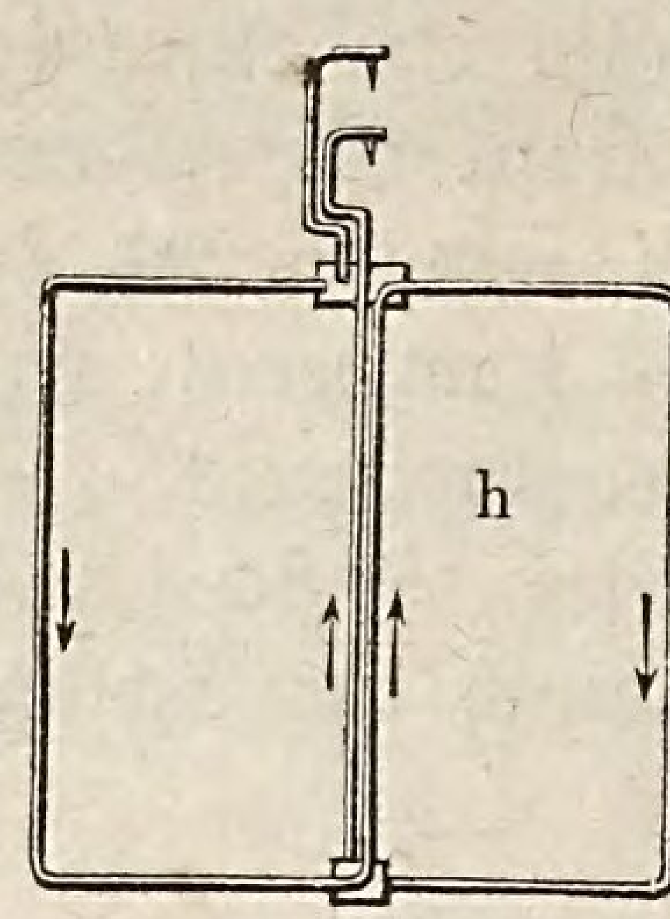
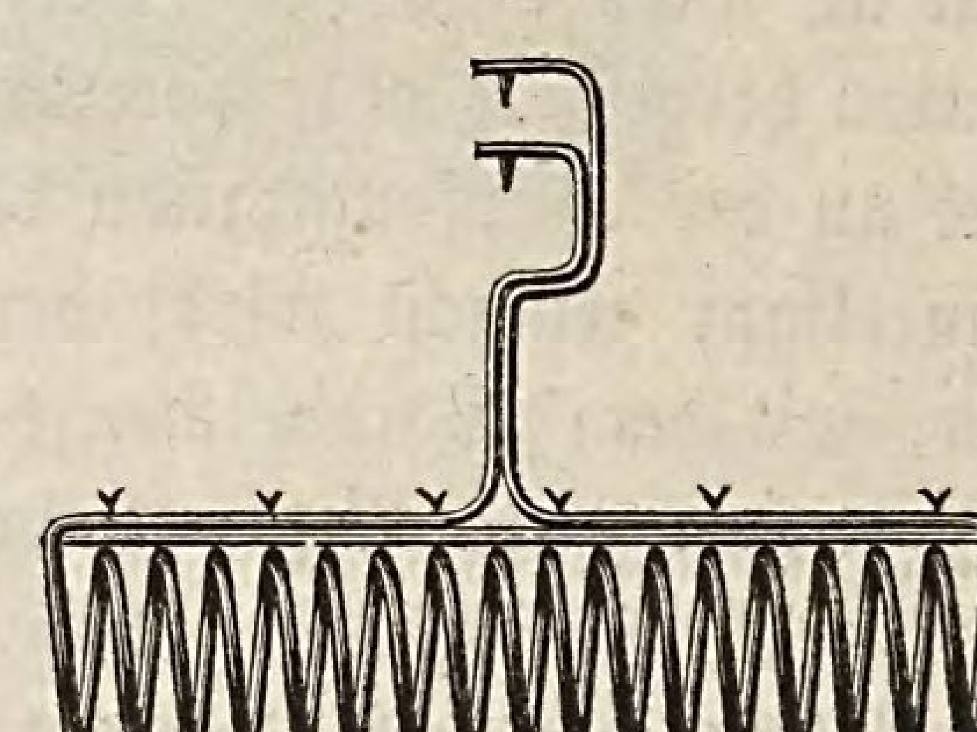


Fig. 472.



Nähert man dem so aufgehängten durchströmten Leiter einen Magnetstab, so wird jener kräftig angezogen oder abgestoßen und erfährt eine entsprechende Drehung um seine vertikale Umdrehungsaxe.

Schon der Erdmagnetismus wirkt richtend auf den beweglichen durchströmten Leiter; überläßt man diesen sich selbst, so stellt er sich so, daß seine Ebene rechtwinklig auf der Ebene des magnetischen Meridians steht, und zwar stets so, daß der Strom von der Südseite her betrachtet in gleicher Richtung kreist wie der Zeiger einer Uhr.

Kehrt man den Strom um, so macht der Draht um seine vertikale Umdrehungsaxe eine halbe Umdrehung und kommt dann erst wieder ins Gleichgewicht. Um den Strom rasch umkehren zu können, benutzt man hier nicht näher zu beschreibende Vorrichtungen, welche den Namen der Stromwender, Kommutatoren oder Gyrotrope führen.

Da ein durchströmter kreisförmiger Leitungsdraht, Fig. 470, welcher um seine vertikale Axe drehbar ist, sich rechtwinklig auf den magnetischen Meridian einstellt, so muß sich auch ein Solenoïd, d. i. ein Schraubendraht, Fig. 472, welches an dem Ampère'schen Gestell aufgehängt und durchströmt wird, so einstellen, daß die Ebene der einzelnen Windungen gleichfalls recht-

winklig auf der Ebene des magnetischen Meridians steht und also die Axe des Solenoïdes in den magnetischen Meridian zu liegen kommt.

Es versteht sich von selbst, daß das Stäbchen, an welchem die einzelnen Windungen des Solenoïds, Fig. 472, oben befestigt sind, aus einer isolierenden Substanz, also etwa aus Holz besteht.

Ein solches Solenoïd ahmt vollkommen die Deklinationsnadel nach, es hat seinen Nord- und seinen Südpol. Nähert man einem Pole des durchströmten Solenoïds den einen Pol eines Magnetstabes, so findet Anziehung oder Abstoßung statt. Ein jeder Pol des Solenoïds wird vom gleichnamigen Pole des Magnetstabes abgestoßen, vom ungleichnamigen angezogen.

Den astatischen Nadeln entsprechend, hat man auch astatische Leitungsdrähte konstruiert, welche, wie der Leiter Fig. 471, aus zwei Teilen bestehen, die der Erdmagnetismus in entgegengesetztem Sinne zu drehen sucht, so daß das ganze System nun kein Bestreben mehr zeigt, unter dem Einfluß des Erdmagnetismus eine bestimmte Stellung einzunehmen.

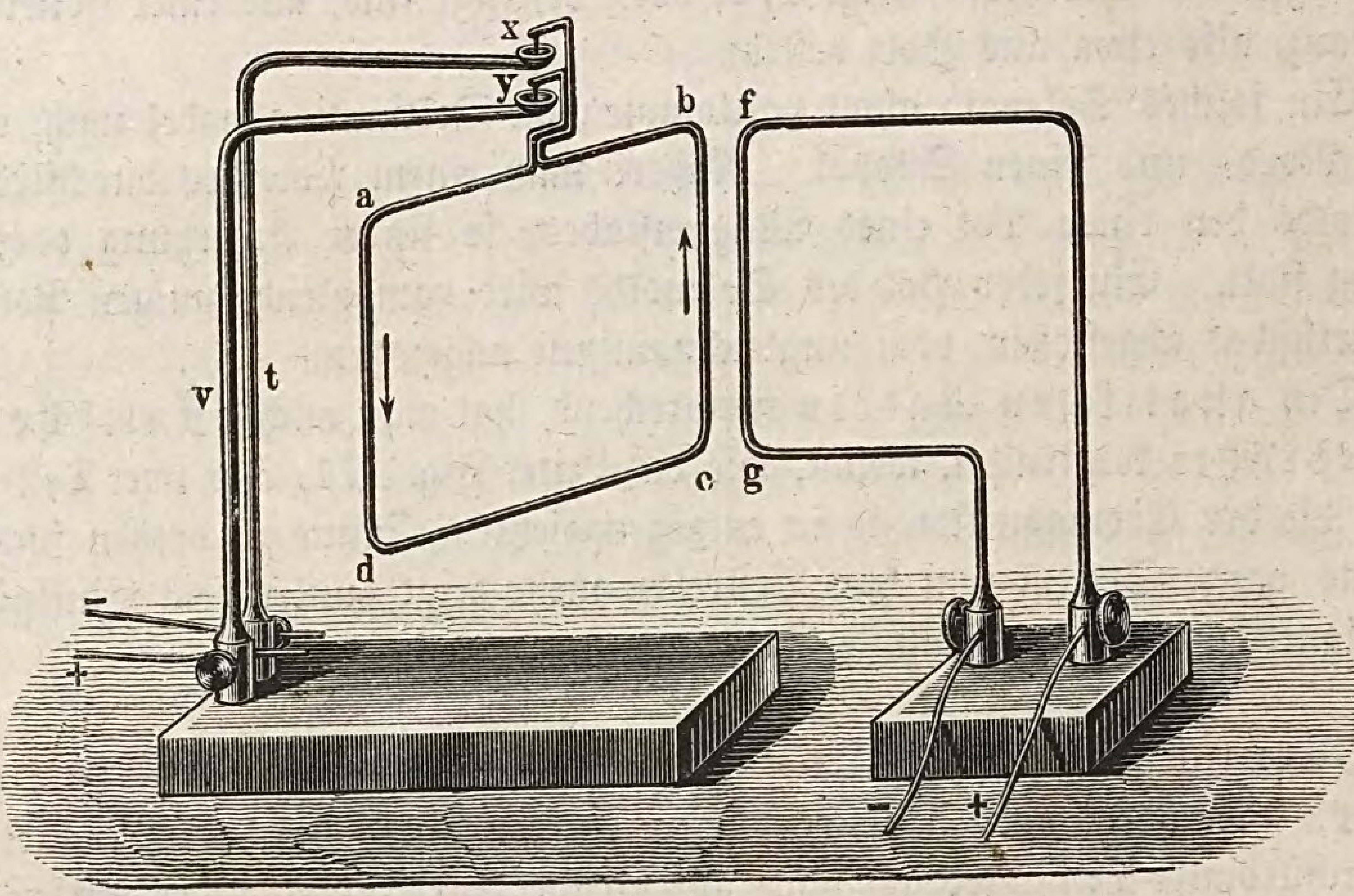
Gegenseitige Wirkungen galvanischer Ströme auf ein- 237
ander. Nachdem einmal nachgewiesen worden war, daß ein Magnet und ein durchströmter Leitungsdraht ganz auf gleiche Weise aufeinander wirken, wie zwei Magnete, ließ sich erwarten, daß auch zwei durchströmte Leitungsdrähte anziehende oder abstoßende Wirkungen auf einander ausüben werden. Daß dies in der That der Fall ist, hat Ampère nicht allein nachgewiesen, sondern er hat auch die Gesetze der gegenseitigen Einwirkung zweier durchströmter Leitungsdrähte entwickelt. Derjenige Teil der Physik, welcher diese Gesetze behandelt, wird Elektrodynamik genannt.

Betrachten wir zunächst zwei parallel neben einander herlaufende Ströme, so ergiebt sich, daß sie einander anziehen, wenn sie gleich gerichtet, daß sie aber einander abstoßen, wenn sie entgegengesetzt gerichtet sind; die Intensität dieser Wirkung hängt ab von der Länge der parallel neben einander herlaufenden Leitungsdrähte, von der Entfernung derselben und von der Stärke der sie durchlaufenden Ströme.

Die eben besprochene gegenseitige Einwirkung paralleler Ströme läßt sich mit Hülfe des Ampère'schen Gestelles in folgender Art nachweisen. Man hänge in die Quecksilbernäpfchen x und y, Fig. 473 (a. f. S.), einen rechtwinkligen Stromleiter $abcd$ und stelle, wenn sich derselbe unter dem Einfluß des Erdmagnetismus eingestellt hat, den rechtwinklig gebogenen Leitungsdraht, Fig. 474 (a. f. S.), so daneben, daß das vertikale Drahtstück fg, Fig. 474, sich in der Nähe des vertikalen Drahtstückes bc, Fig. 473, aber außerhalb der Ebene des beweglichen Leiters befindet. Man beobachtet nun eine Anziehung oder eine Abstoßung zwischen den benachbarten vertikalen Stromarmen, je nachdem der Strom in ihnen gleich oder entgegengesetzt gerichtet ist. Man stellt den Versuch am besten in der Weise an, daß man den Strom einer Säule von etwa drei Bunsen'schen Bechern durch den beweglichen Stromleiter, den Strom von drei anderen durch den festen Draht, Fig. 474, hindurchgehen läßt.

Sind die Ströme in bc, Fig. 473, und in fg, Fig. 474, gleich gerichtet, so daß Anziehung zwischen ihnen stattfindet, so braucht man nur in dem beweglichen

Fig. 473. Fig. 474.

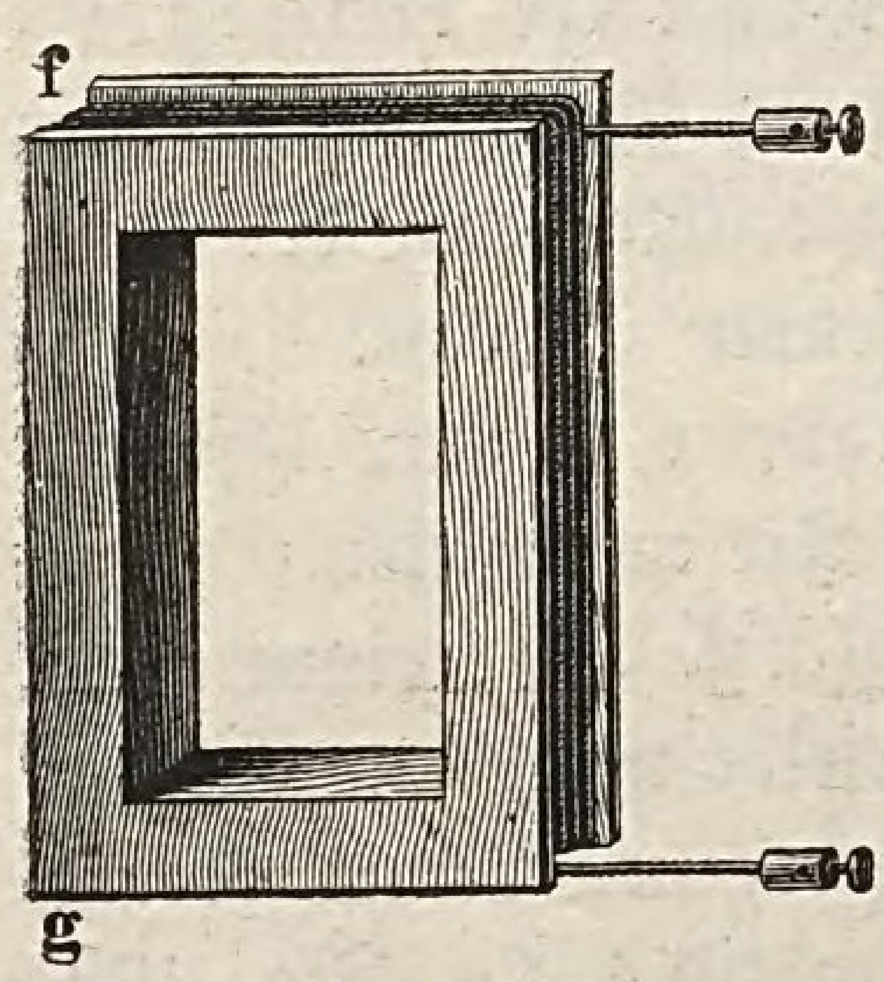


Stromleiter, Fig. 473, oder in dem festen, Fig. 474 mittels eines Kommutators den Strom umzukehren, um die Anziehung in Abstoßung zu verwandeln.

Der Versuch gelingt noch besser, wenn man statt des beweglichen Leiters, Fig. 473, den beweglichen astatischen Leiter, Fig. 471, anwendet.

Auch ist es zur Erzielung einer kräftigen Wirkung zweckmäßig, statt des einfachen festen Drahtes, Fig. 474, einen Drahtrahmen, Fig. 475, anzuwenden, welcher aus 20 bis 30 Windungen eines 1 bis 2 mm dicken übersponnenen Drahtes gebildet ist.

Fig. 475.



Ströme, welche nicht parallel sind, werden gekreuzte Ströme genannt. Liegen sie in derselben Ebene, so ist der Kreuzungspunkt derjenige Punkt, in welchem ihre Richtungen sich schneiden, andernfalls ist es ein beliebiger Punkt derjenigen Geraden, welche die einander zunächst liegenden Punkte der beiden Ströme verbindet. Zwei gekreuzte Ströme suchen sich immer so parallel zu stellen, daß sie sich nach derselben Richtung hin bewegen, oder mit anderen Worten: es findet Anziehung zwischen denjenigen Teilen des Stromes statt, welche nach dem Kreuzungspunkte hinfließen, und ebenso zwischen denen, welche vom Kreuzungspunkte wegfließen. Abstoßung aber findet statt zwischen einem Drahtstück, in welchem der Strom nach dem Kreuzungspunkte hin-, und einem anderen, in welchem er von ihm wegfließt.

Sind z. B. *ab* und *cd*, Fig. 476, zwei Ströme, deren Kreuzungspunkt *r* ist, so findet eine Anziehung zwischen den Teilen *ar* und *cr* statt, in welchen

Fig. 476.

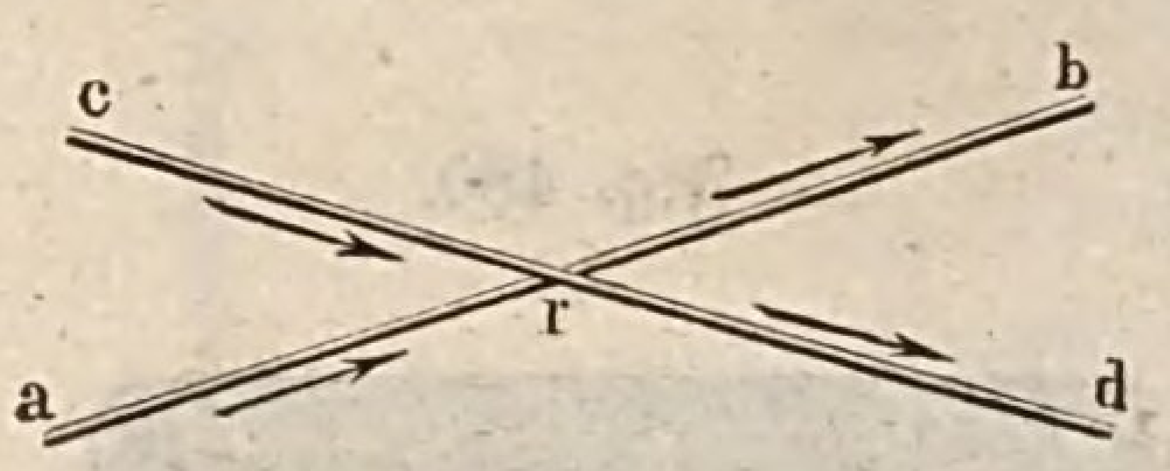


Fig. 478.

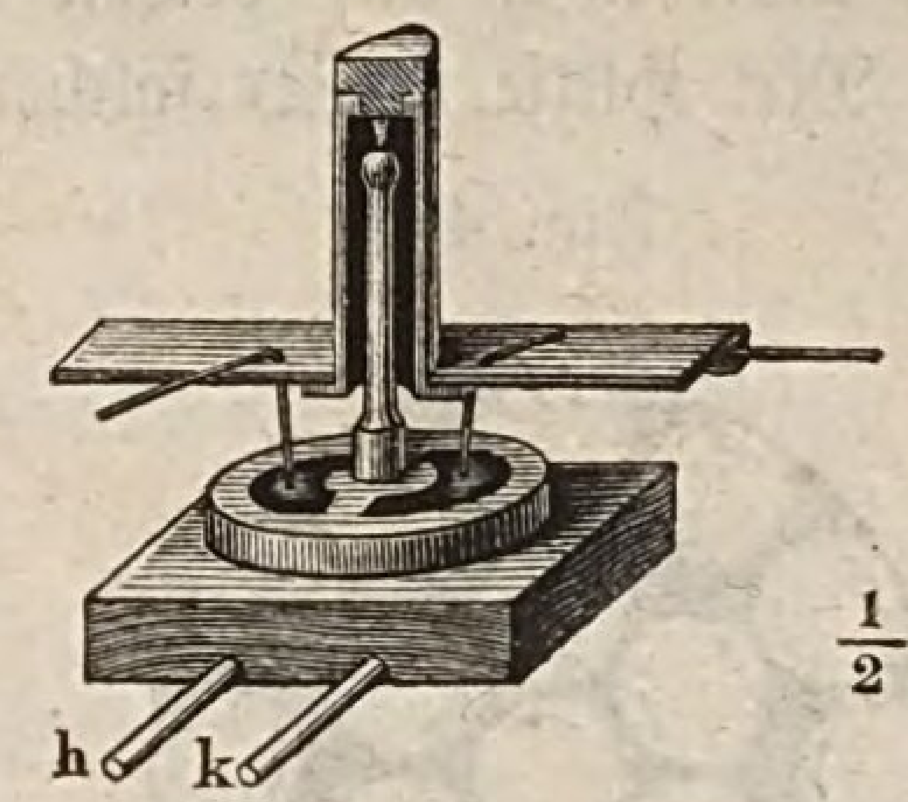
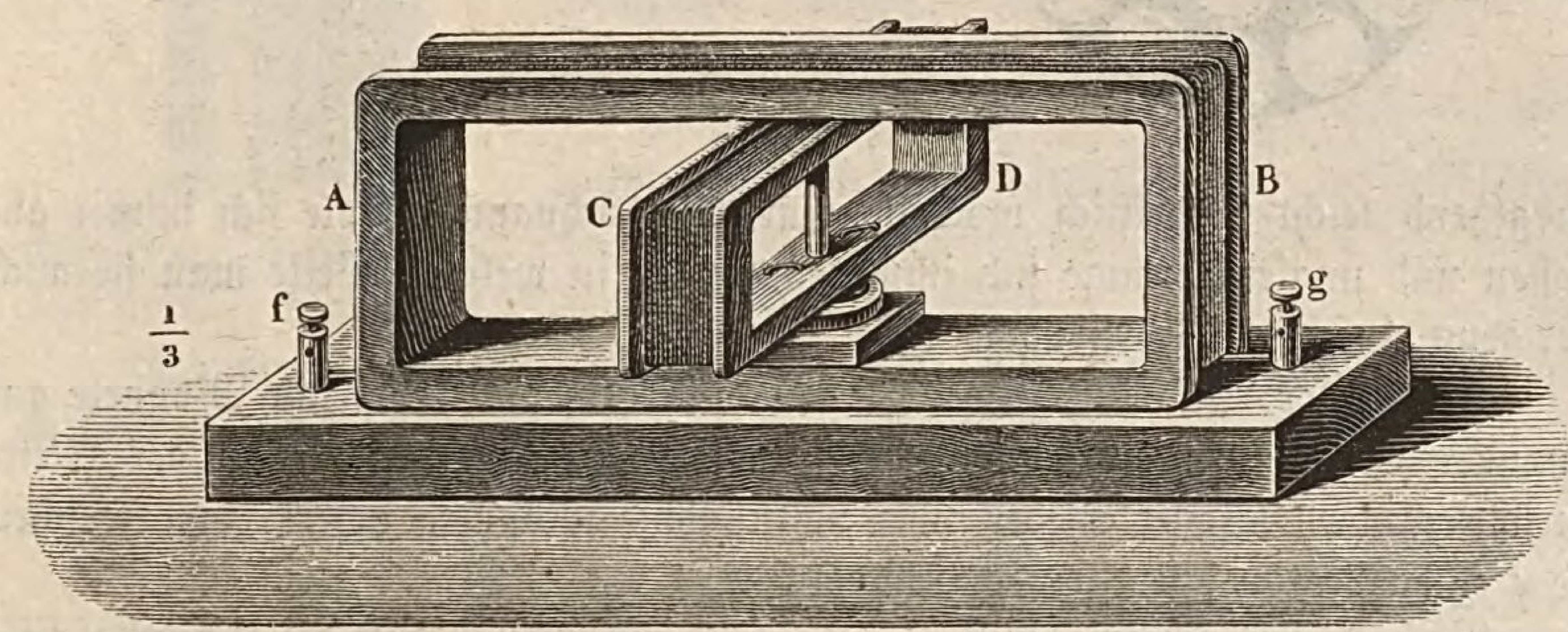


Fig. 477.



der Strom nach dem Kreuzungspunkte hingeht, und ebenso zwischen den Teilen *rb* und *rd*, in welchen er vom Kreuzungspunkte fortgeht; dagegen findet zwischen *ar* und *rd*, sowie zwischen *cr* und *rb* Abstoßung statt.

Diese Erscheinungen lassen sich sehr gut mit Hülfe des Garthe'schen Apparates, Fig. 477 und 478, nachweisen.

Ampère's Theorie des Magnetismus. Das Princip dieser 238
Theorie besteht darin, jedes Molekül eines Magnets als beständig von einem Strome umflossen zu betrachten, welcher in sich selbst zurückkehrt und der Einfachheit wegen als kreisförmig angenommen werden kann. Man stellt sich nach dieser Theorie jeden auf der Axe des Magnets rechtwinkligen Querschnitt ungefähr auf die durch Fig. 479 (a. f. S.) anschaulich gemachte Weise vor. Statt aller einzelnen elementaren Ströme eines jeden Querschnitts aber kann man sich diesen von einem einzigen Strome umkreist denken, welcher gleichsam die Resultierende der elementaren Ströme dieses Querschnittes ist, und somit läßt sich ein Magnetstab als ein System von unter sich parallelen geschlossenen Strömen denken, ungefähr so, wie es Fig. 480 (a. f. S.) anschaulich macht.

Was hier von einem Magnetstabe gesagt ist, läßt sich auch auf eine Magnetnadel, kurz, auf jeden beliebig geformten Magnet anwenden.

Um die Erklärung der Anziehung und Abstoßung der Pole in verschiedenen Stellungen der Magnete gegen einander recht anschaulich zu machen, zeichne

man, am besten auf Cylindern von Holz oder Pappe, die ungefähr 30 bis 40 cm lang sind und 3 bis 5 cm im Durchmesser haben, Pfeile in der Weise, wie man Fig. 480 sieht, welche die Richtung der Ströme darstellen; ferner bezeichne man noch auf beiden Cylindern die Nordpole mit *N*, die Südpole mit *S*. Mit Hülfe zweier solcher Modelle läßt sich von den Sätzen des §. 237

Fig. 479.

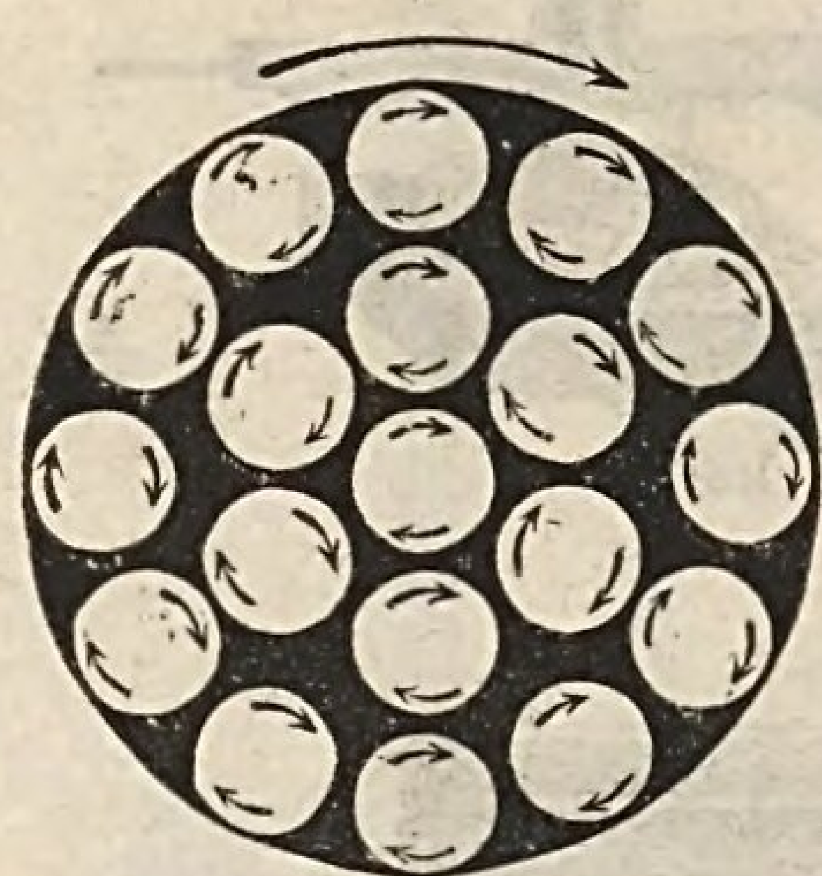
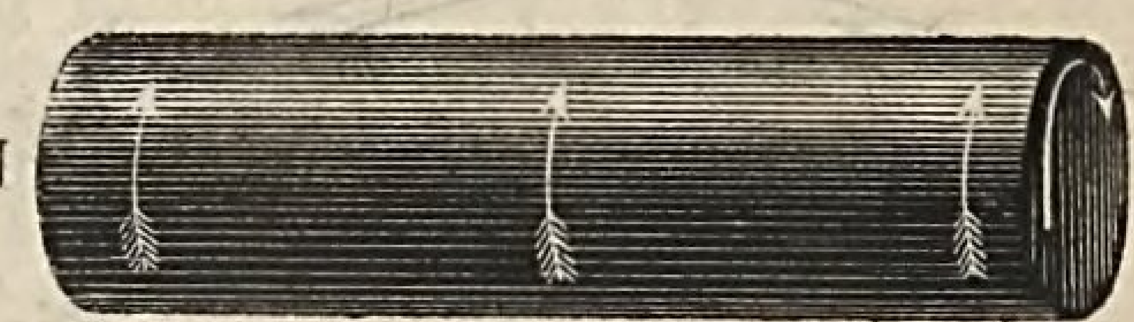


Fig. 480.



ausgehend leicht begreiflich machen, warum gleichnamige Pole sich immer abstoßen und ungleichnamige sich immer anziehen, in welcher Weise man sie auch übrigens einander nähern mag.

Aus dieser Anschauungsweise ergiebt sich nun auch, warum Magnete auf einander wirken wie durchströmte Schraubendrähte, warum ein in der Mitte durchbrochener Magnet wieder zwei vollständige Magnete liefert, von welchen jeder einen Nordpol und einen Südpol hat.

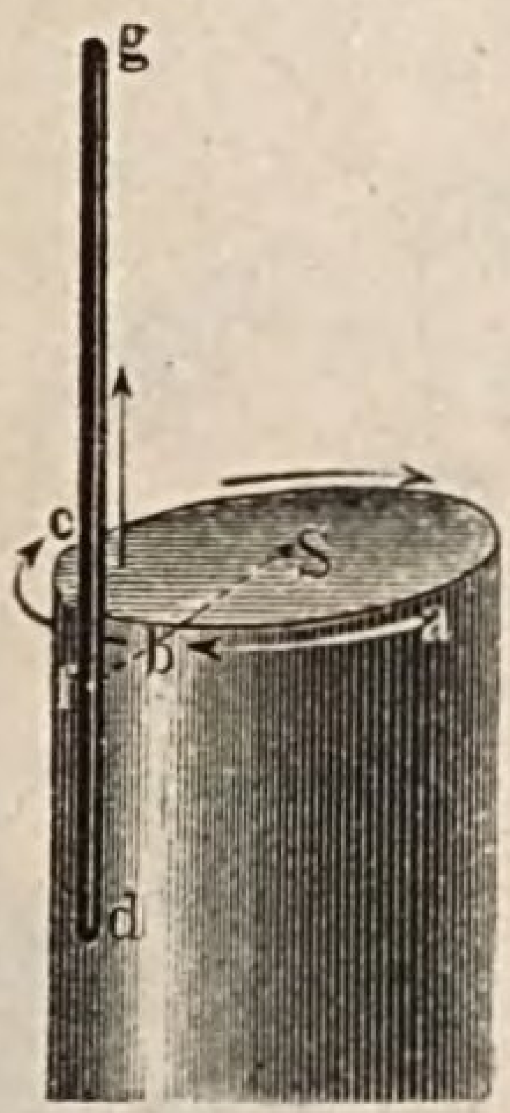
Nach dieser Theorie muß man also annehmen, daß die Eisenmoleküle beständig von den erwähnten Elementarströmen umkreist werden, die auf ihrem Wege um das Eisenmolekül keinen Leitungswiderstand zu überwinden haben; denn sonst könnten sie ohne fortwirkende elektromotorische Kraft nicht kontinuierlich sein. In nicht magnetischem weichem Eisen oder Stahl haben sie alle möglichen verschiedenen Lagen. Die Magnetisierung des weichen Eisens besteht nach dieser Theorie darin, daß die schon vorhandenen Elementarströme parallel gerichtet werden; die Grenze der Magnetisierung ist erreicht, wenn die Ströme aller Eisenmoleküle die gleiche Lage haben. Hört die magnetisierende Kraft zu wirken auf, so kehren die Ströme wieder in ihre vorherige regellose gegenseitige Lage zurück; nur im Stahl behalten sie wenigstens teilweise ihren Parallelismus bei, und darauf beruht das Magnetischbleiben des Stahls.

239 **Rotation beweglicher Ströme und Magnete.** Es sei *S*, Fig. 481, der Südpol eines vertikal stehenden Magnets, *dg* ein neben ihm befindlicher, noch über den Pol *S* des Magnets hinausragender Leitungsdraht, in welchem ein positiver Strom aufsteigt. Bezeichnen wir nun mit *f* denjenigen Punkt des Drahtes, welcher mit dem oberen Ende des Magnets in gleicher Höhe liegt, so ist nach den in §. 237 auseinandergesetzten Principien klar, daß das Stück *ab* des Magnetstromes auf das Drahtstück *fg* abstoßend wirkt, während dasselbe von dem Teile *bc* des Magnetstromes angezogen wird; ist also der Leitungs-

draht dg um die vertikale Achse des Magnets frei drehbar, so muß er infolge dieses Impulses in der Richtung der Pfeile ab und bc um den Magnet rotieren.

Die gleiche Wirkung übt nun der Magnetstrom eines jeden horizontalen Querschnitts des Magnets auf das über ihm befindliche Stück des Drahtes dg aus, während er den unterhalb seiner Ebene befindlichen Teil des Drahtes in entgegengesetzter Richtung zu drehen strebt. Der Draht wird aber doch in der zuerst bezeichneten Richtung, in der Richtung der Pfeile ab und bc, rotieren, denn die Summe der Kräfte, welche ihn in dieser Richtung zu drehen streben, ist über die entgegengesetzt wirkenden weitaus überwiegend, weil sich der Draht nicht bis zum unteren Ende des Magnets erstreckt, wohl aber bedeutend über das obere Ende desselben hinausragt.

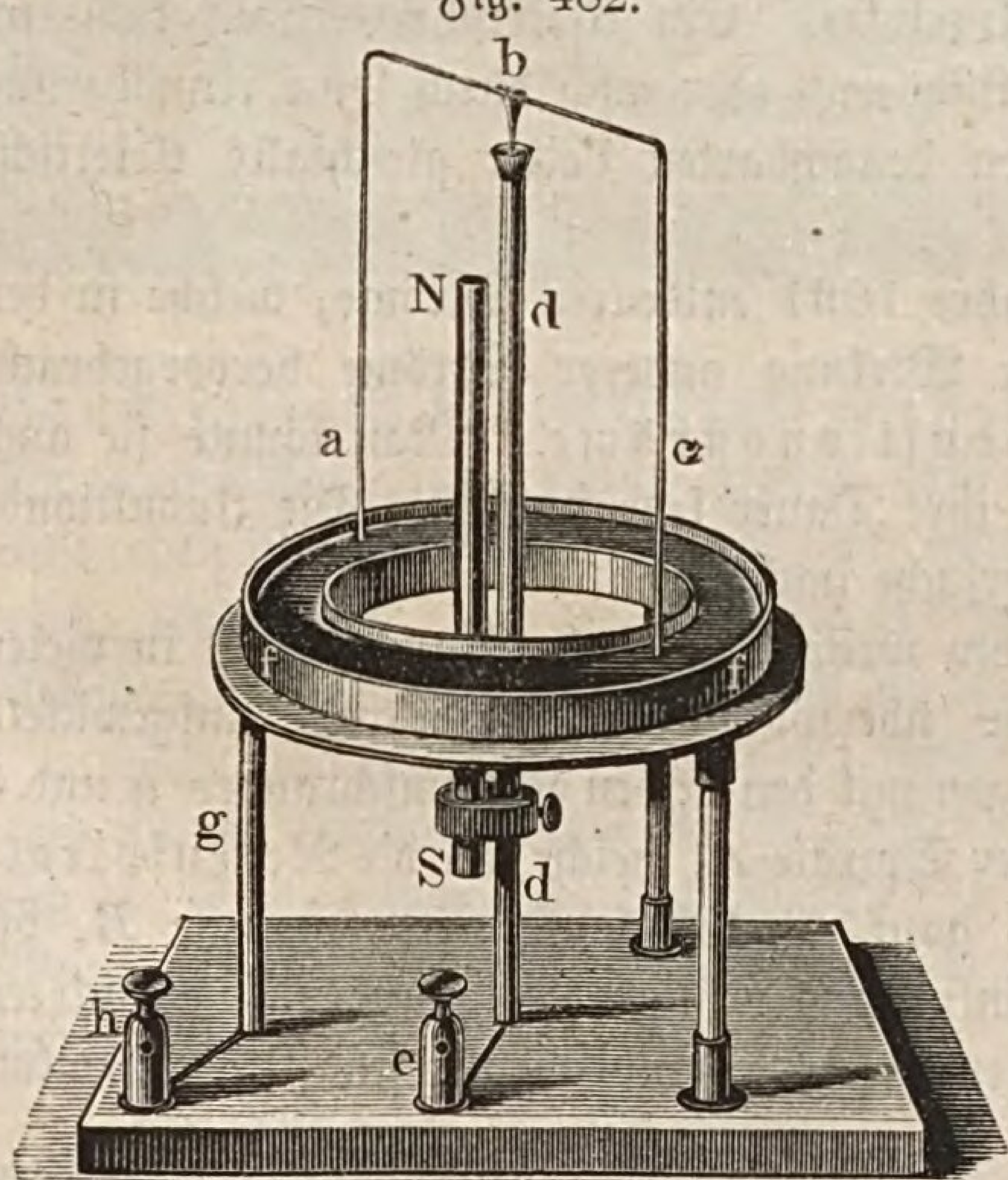
Fig. 481.



Bei umgekehrter Stromrichtung muß der Draht unter sonst gleichen Umständen in entgegengesetzter Richtung rotieren. Ebenso hat eine Umkehrung der Polarität des Magnets eine Umkehrung der Rotationsrichtung zur Folge.

Fig. 482 stellt einen Apparat dar, mit welchem man die eben besprochene Rotationserscheinung zeigen kann. Eine Metallsäule dd, welche unten mit der Klemmschraube e verbunden ist, trägt oben ein stählernes Quecksilbernäpfchen, in welches mittels einer Stahlspitze der kupferne Drahtbügel abc eingesetzt ist. Die unteren Enden dieses Drahtbügels tauchen in eine Quecksilberrinne f, welche mit der Klemmschraube h durch den Metallstab g leitend verbunden ist. Wird nun bei h der positive, bei e der negative Pol der Säule eingeschraubt, so geht der positive Strom in den Drahtarmen a und c in die Höhe, dann von beiden Seiten nach b und von da durch die Säule dd herab.

Fig. 482.



An der Säule dd ist eine Fassung angebracht, welche auf- und niedergeschoben und in beliebiger Höhe festgeschraubt werden kann; sie trägt den kräftigen Stahlmagnet NS, unter dessen Einfluß der durchströmte Leiter in Rotation gerät.

Auf ähnliche Weise läßt sich auch eine Rotation eines beweglichen Magnets um einen festen Strom hervorbringen; man hat die Apparate, welche zur Hervorbringung solcher Rotationen dienen, auf die mannigfachste Weise abgeändert.

Viertes Kapitel.

Induktionserscheinungen.

240 **Induktion im Nebendrahte.** Ein elektrischer Strom kann im Momente seines Beginnens oder Aufhörens oder auch durch seine Annäherung oder Entfernung in einem anderen benachbarten Leiter gleichfalls elektrische Ströme erzeugen.

Diese von Faraday im Jahre 1831 entdeckten Ströme, welche in den Leitern durch eine Art verteilender Wirkung anderer Ströme hervorgebracht werden, führen den Namen der Induktionsströme. Man könnte sie auch temporäre Ströme nennen, weil ihre Dauer sehr kurz ist. Die Induktionsströme lassen sich durch folgende Versuche nachweisen.

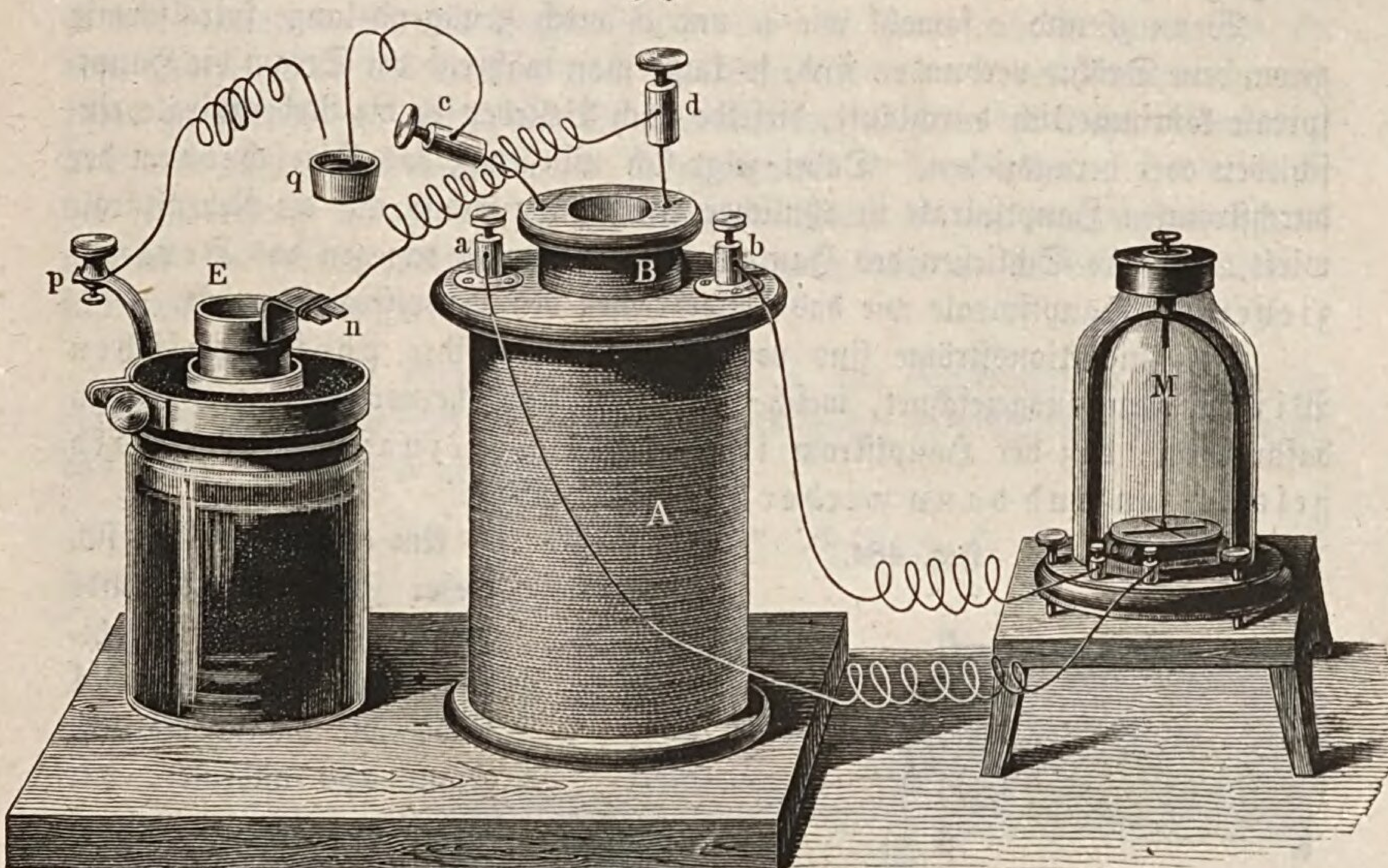
Auf eine im Lichten 3 bis 4 cm weite Spule *A*, Fig. 483, ist in vielen Windungen ein dünner mit Seide übersponnener Kupferdraht aufgewickelt, dessen Enden der Bequemlichkeit wegen mit den beiden Klemmschrauben *a* und *b* versehen sind. In die Höhlung dieser Spirale *A*, welche wir die Nebenspirale nennen wollen, paßt eine zweite, ganz ähnlich konstruierte Spirale *B*, die Hauptspirale, welche aber gewöhnlich aus weniger Windungen eines dickeren Drahtes besteht. Auch die Drahtenden der Hauptspirale sind mit Klemmschrauben *c* und *d* versehen.

Während nun die Klemmschrauben *a* und *b* der Nebenspirale *A* durch Leitungsdrähte mit einem Multiplikator *M* in Verbindung gesetzt werden, wird die Hauptspirale *B* in den Schließungsbogen eines entsprechenden Rheomotors (etwa eines einfachen Bunsen'schen Bechers, oder einer Säule von zwei Daniell'schen Bechern, oder einer Säule von vier Wollaston'schen Plattenpaaren) gebracht, jedoch so, daß der Strom jederzeit leicht geschlossen und wieder unterbrochen werden kann. Es geschieht dies am einfachsten mittels eines

Quecksilbernäpfchens q, in welchem der von c kommende Leitungsdraht beständig eingetaucht bleibt, während der von p kommende Draht nach Belieben in q eingetaucht und dann wieder daraus herausgezogen werden kann.

In dem Augenblick nun, in welchem die Kette durch Eintauchen des von p kommenden Drahtes in das Quecksilbernäpfchen q geschlossen und in der

Fig. 483.



Hauptspirale B ein Strom entsteht, erfährt die Nadel des Multiplikators eine Ablenkung, welche anzeigt, daß auch in der Nebenspirale ein Strom entstanden ist. Aus der Richtung, nach welcher die Multiplikatornadel abgelenkt wird, ergiebt sich, daß die Richtung des in der Nebenspirale induzierten Stromes der Richtung des Hauptstromes entgegengesetzt ist.

Läßt man den Hauptstrom geschlossen, so kehrt die Nadel des Multiplikators nach einigen Schwingungen wieder auf den Nullpunkt zurück, woraus hervorgeht, daß die Strombildung im Nebendrahte nur eine momentane war, welche in dem Momente erzeugt wurde, in welchem der Strom in der Hauptspirale zu cirkulieren begann.

Die Nadel des Multiplikators bleibt nun ruhig, so lange der Hauptstrom die Hauptspirale durchläuft; in dem Augenblicke aber, in welchem durch das Herausnehmen des von p kommenden Drahtes aus dem Quecksilbernäpfchen q der Strom unterbrochen wird, findet eine abermalige Ablenkung der Multiplikatornadel statt. Die Ablenkung ist der zuerst beobachteten entgegengesetzt und zeigt also an, daß der bei Unterbrechung des Hauptstromes im Nebendraht hervorgerufene Strom mit dem Hauptstrome gleich gerichtet ist.

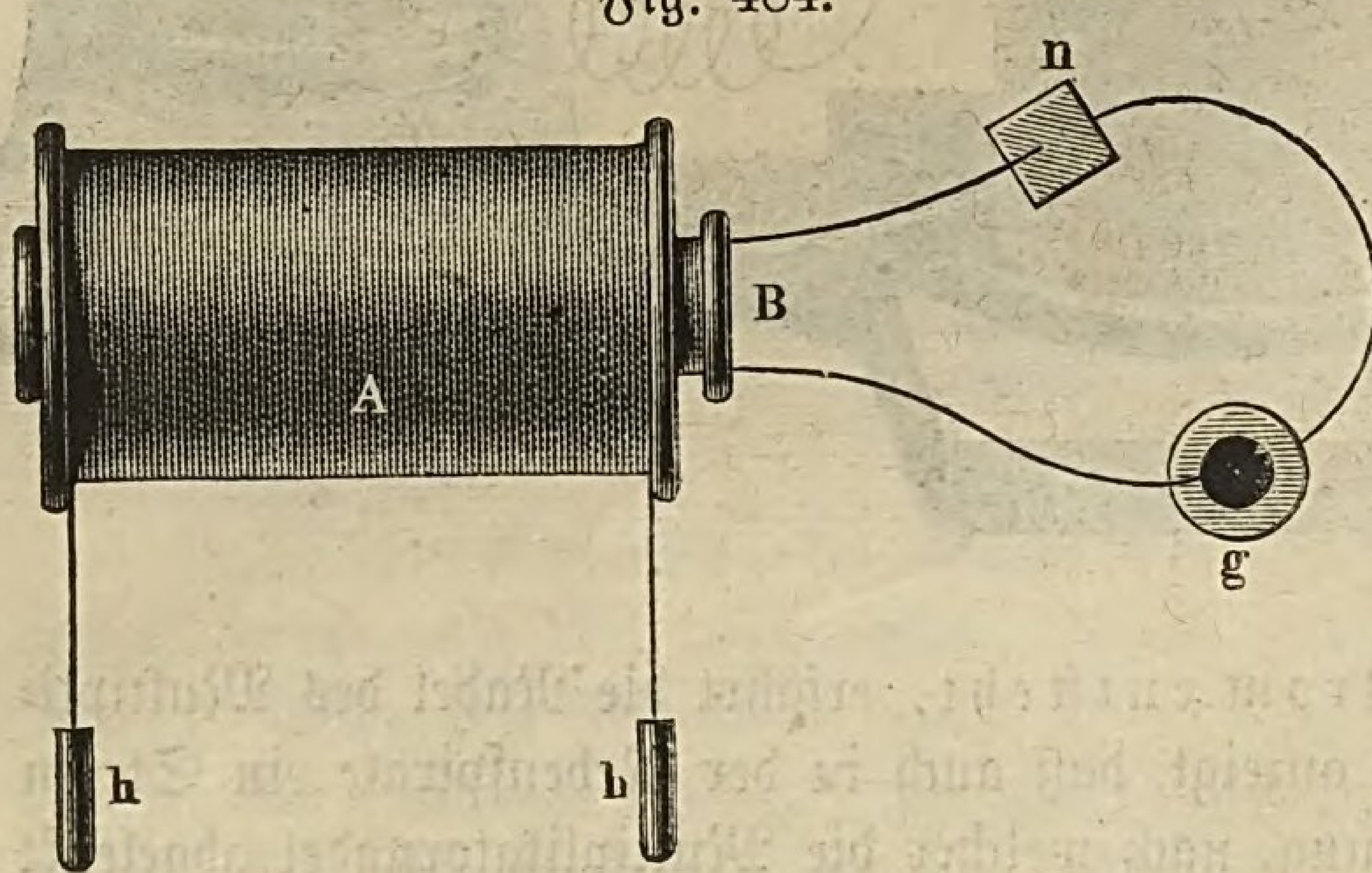
Nach Faraday's Ausdruck wird also sowohl beim Entstehen als auch beim Verschwinden des von der Säule herrührenden Stromes im Hauptdrahte ein vorübergehender Strom im Nebendrahte induziert.

Der im Nebendrahte induzierte Strom ist mit dem Hauptstrome gleich gerichtet, wenn der Hauptstrom aufhört, dagegen entgegengesetzt gerichtet, wenn der Hauptstrom beginnt.

Wenn *p* und *c* sowohl wie *n* und *d* durch genügend lange spiralförmig gewundene Drähte verbunden sind, so kann man während der Strom die Hauptspirale kontinuierlich durchläuft, dieselbe nach Belieben in die Nebenspirale einschieben oder herausziehen. Dabei zeigt sich nun, daß das Einschieben der durchströmten Hauptspirale in ähnlicher Weise induzierend auf die Nebenspirale wirkt, wie das Schließen des Hauptstromes, während dagegen das Herausziehen der Hauptspirale wie das Unterbrechen des Hauptstromes wirkt.

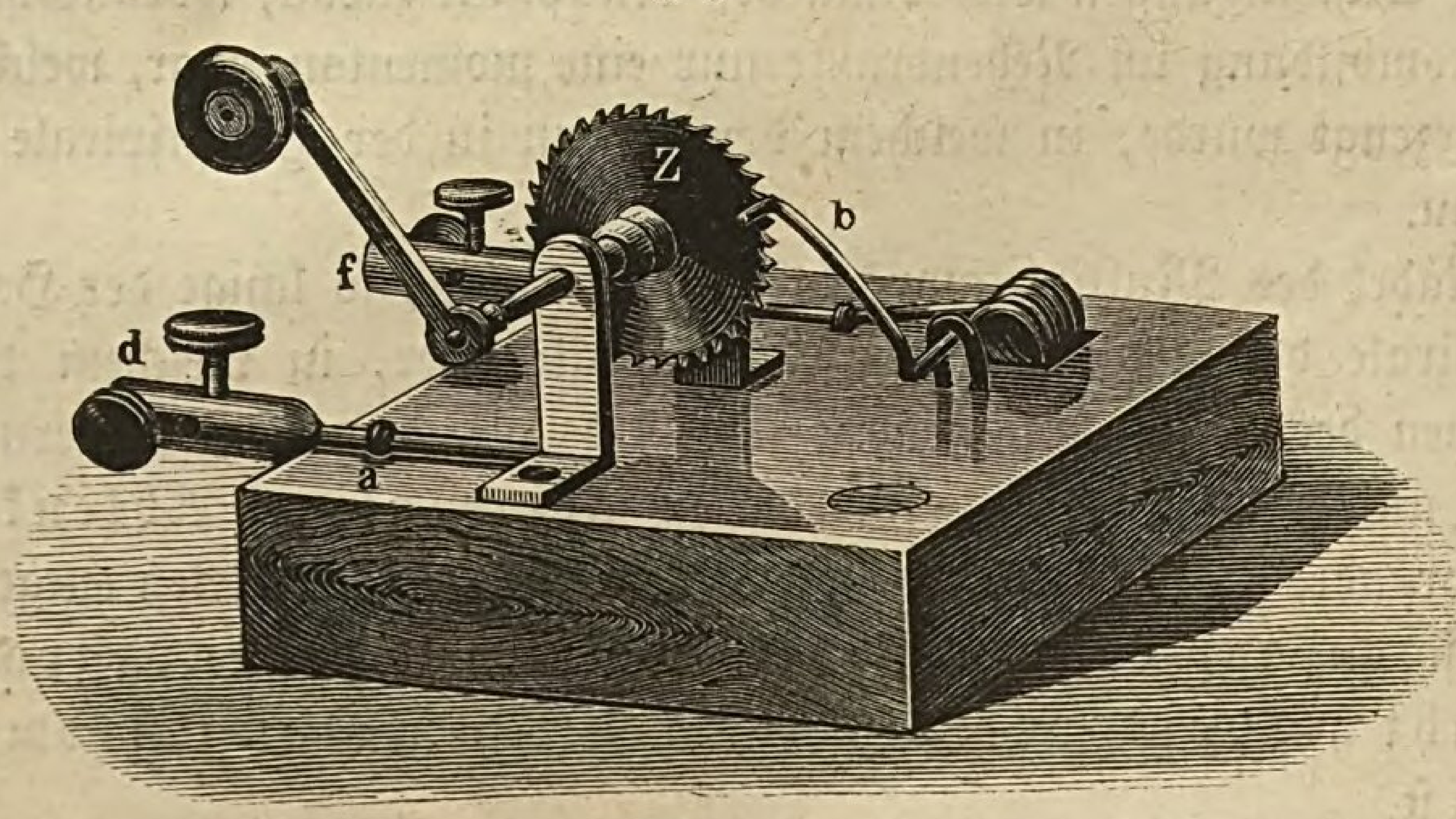
Die Induktionsströme sind vorzugsweise durch ihre physiologischen Wirkungen ausgezeichnet, welche besonders stark hervortreten, wenn man dafür sorgt, daß der Hauptstrom in rascher Aufeinanderfolge bald geschlossen und dann wieder geöffnet wird.

Fig. 484.



Am einfachsten läßt sich dieser Zweck auf folgende Weise erreichen. Die Drahtenden der Nebenspirale *A* sind, wie die schematische Figur 484 andeutet, mit metallenen Handgriffen *h* versehen. Außer der Hauptspirale *B*, welche in die Nebenspirale eingesteckt ist, befindet sich aber noch ein Unterbrechungsrad bei *n* im Schließungsbogen des galvanischen Bechers *g*. Die Einrichtung des Unterbrechungsrades ist aus Fig. 485 zu ersehen. Auf einem Holzklotze stehen

Fig. 485.

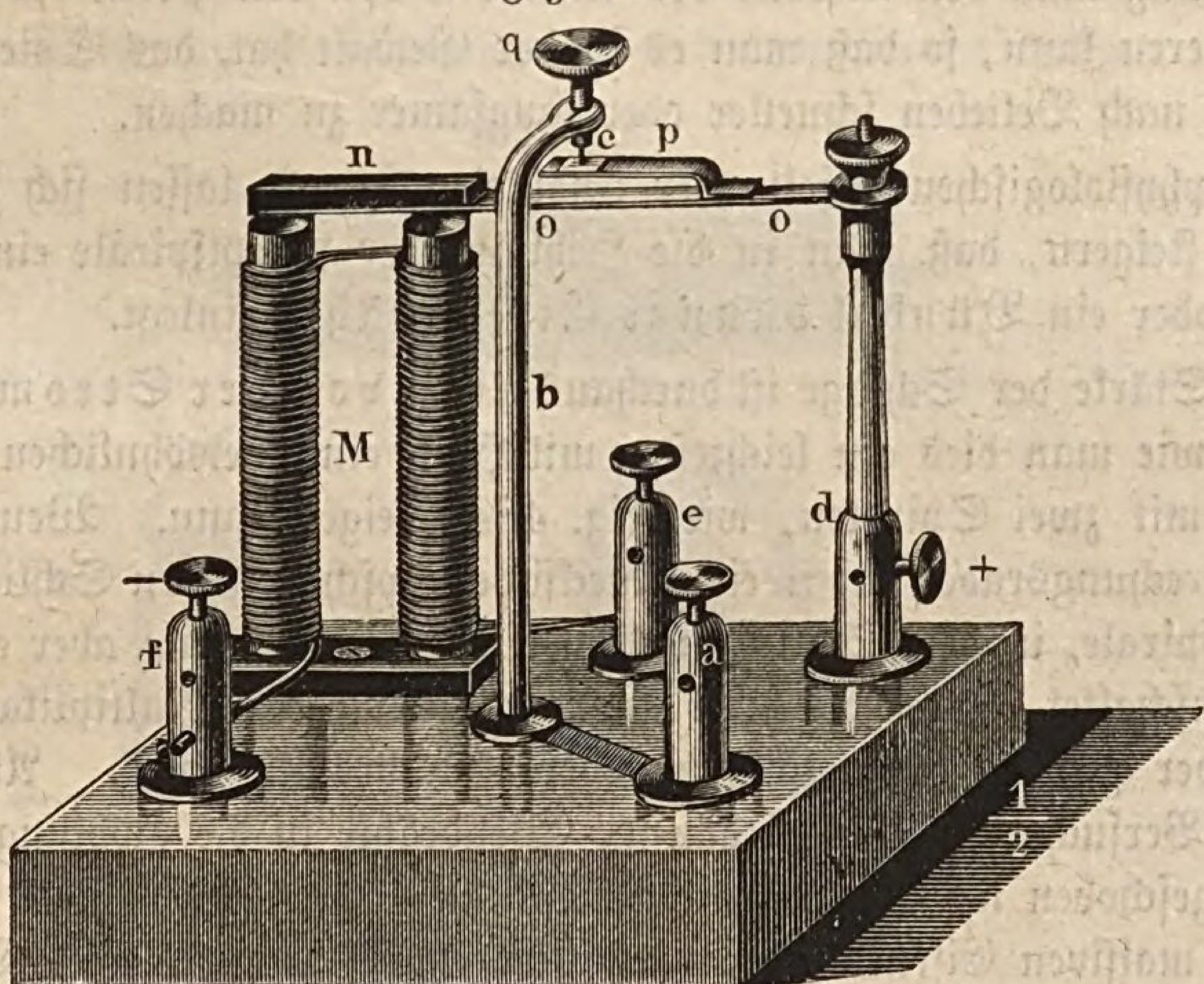


zwei Messingpfeiler, welche die metallene Axe eines messingenen Zahnrades *Z* tragen, dessen Zähne etwa so geschnitten sind, wie die Zähne des Steigrades einer gewöhnlichen Pendeluhr. An dem einen Messingpfeiler ist der Kupferdraht *a* befestigt, während ein zweiter Kupferdraht *b* federnd gegen das Rad drückt. Man kann nun leicht diesen Apparat in den Schließungsbogen der Kette einschalten; man braucht nur durch einen Draht das eine Ende der Hauptspirale *B* mit dem einen Pol des Bechers *g* zu verbinden, dann einen Verbindungsdraht vom anderen Pole des Bechers nach der Schraubklemme *d* des Unterbrechungsrades zu führen und endlich eine Drahtverbindung zwischen der Schraubklemme *f* und dem anderen Drahtende der Hauptspirale *B* herzustellen. So oft nun bei Umdrehung des Rades *Z* der federnde Draht *b* von einem Zahne zum anderen überspringt, erfolgt eine Unterbrechung und ein alsbaldiges Wiederschließen des Stromes.

Faßt nun eine Person die Handgriffe *h* mit angefeuchteten Händen, so empfindet sie eine Reihe rasch aufeinander folgender elektrischer Schläge, wenn das Unterbrechungsrad gedreht wird.

Eine andere Unterbrechungsvorrichtung ist der in Fig. 486 dargestellte magnetische Hammer.

Fig. 486.



Der eine Poldraht des Rheomotors, etwa der positive, wird in das Messingsäulchen *a*, der andere in *f* eingeschraubt, während das eine Drahtende der Hauptspirale des Induktionsapparates bei *d*, das andere bei *e* eingeschraubt wird. Der Strom geht nun von *a* durch einen in das Holz eingelassenen Messingstreifen zur Messingsäule *b*, dann durch die Platinspitze *c* auf ein Platinplättchen, welches auf die Messingfeder *p* aufgelötet ist, und dann herab bis *d*, um in die Hauptspirale überzugehen. Aus der Hauptspirale gelangt dann der Strom über das Säulchen *e* in die Windungen des Elektromagnets

M und aus diesem zum Säulchen *f*, in welches der andere Pol des elektromotorischen Bechers eingeschraubt ist.

Sobald der Strom die Windungen des Elektromagnets *M* durchläuft, wird dessen Eisenkern magnetisch, so daß er den eisernen Anker *n* anzieht, welcher auf dem einem Ende der messingenen Feder *o* befestigt ist; durch das Niederziehen des Ankers *n* wird auch *p* mit seinem Platinplättchen etwas niedergezogen und dadurch die Berührung zwischen diesem Platinplättchen und der Platinspitze *c* aufgehoben, was dann auch eine Unterbrechung des Stromes in der Hauptspirale und in den Windungen des Elektromagnets *M* zur Folge hat.

Mit den Unterbrechungen des Stromes verliert auch der Elektromagnet *M* seinen Magnetismus und die Kraft der Feder *o* zieht dann sogleich den Anker *n* wieder in die Höhe, wodurch denn zugleich auch die metallische Berührung bei *c* wieder hergestellt wird und das eben beschriebene Spiel von neuem beginnt.

Die Unterbrechungen des Stromes folgen sich hier mit solcher Schnelligkeit, daß man die einzelnen Vibrationen der Feder nicht mehr sehen kann; dagegen hört man ein ununterbrochenes Summen und beobachtet an der Spitze bei *c* ein glänzendes, kontinuierlich erscheinendes Fünkchen.

Die Platinspitze *c* ist am unteren Ende einer Schraube angebracht, durch deren Drehung man den Abstand des Ankers *n* von den Polen des Elektromagnets regulieren kann, so daß man es in der Gewalt hat, das Spiel der Unterbrechungen nach Belieben schneller oder langsamer zu machen.

Die physiologischen Effekte der Induktionsspirale lassen sich dadurch bedeutend steigern, daß man in die Höhlung der Hauptspirale einen massiven Eisenstab oder ein Bündel dünner Eisendrähte einlegt.

Die Stärke der Schläge ist durchaus nicht von der Stromstärke abhängig, wie man dies am leichtesten mit Hülfe eines gewöhnlichen Induktionsapparates mit zwei Spiralen, wie Fig. 484, zeigen kann. Wenn man statt des Unterbrechungsrades bei *n* ein Quecksilbernäpfchen in den Schließungsbogen der Hauptspirale, in den Schließungsbogen der Nebenspirale aber einen Multiplikator einschaltet, so erhält man einen Ausschlag der Multiplikatornadel, so oft bei *n* der Hauptstrom geschlossen oder unterbrochen wird. Als bei einem derartigen Versuche ein Bündel dünner Eisendrähte in die Höhlung der Hauptspirale eingeschoben war, betrug die Ablenkung 45°; nachdem aber das Bündel mit einem massiven Eisencylinder vertauscht war, betrug sie 63°. Obgleich also die Stromstärke bei Anwendung des massiven Eisencylinders bedeutend größer war, so erhielt man doch bei Anwendung des Drahtbündels ungleich stärkere Schläge.

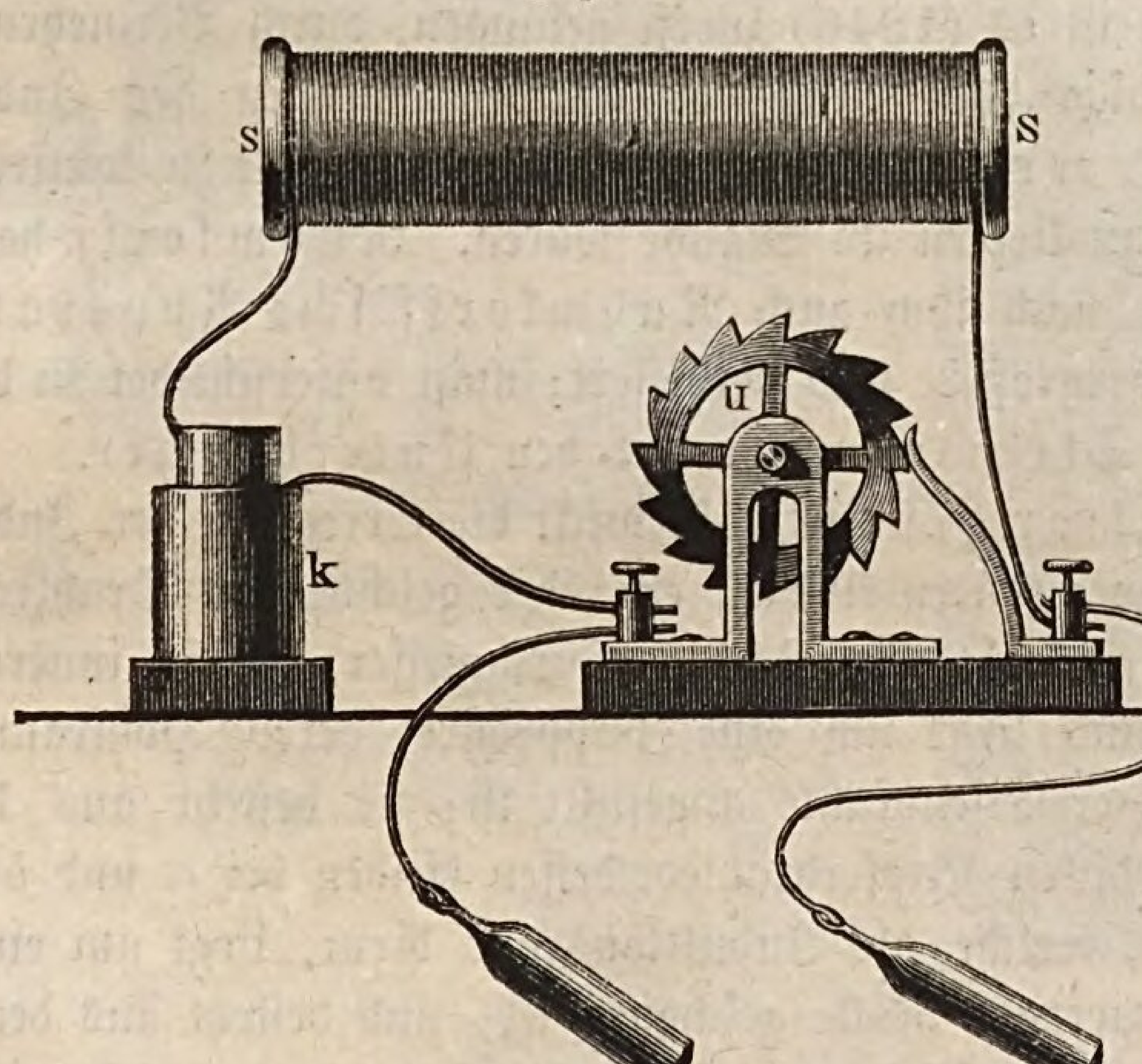
Im allgemeinen ist die Stromstärke der Induktionsströme eine sehr geringe, wie schon daraus hervorgeht, daß man den Multiplikator anwenden muß, um eine Ablenkung der Nadel zu erhalten. Daß dessenungeachtet die Induktionsströme so starke Schläge geben, kann jedoch nicht auffallen, wenn man bedenkt, daß der Entladungsschlag der Leydenerflasche, welcher die Nerven so heftig er=

schüttert, durch einen Multiplikator geleitet doch nur eine sehr schwache Wirkung auf die Nadel ausübt und auch selbst nur dann, wenn man den Entladungsschlag durch Einschaltung einer feuchten Schnur verzögert. Somit ist klar, daß die Stärke der physiologischen Wirkung überhaupt nicht von der Quantität der Elektricität abhängt, welche durch den Körper hindurchgeht, sondern von der Schnelligkeit, mit welcher die Entladung einer gewissen Elektricitätsmenge vor sich geht.

Daraus kann man nun schließen, daß die Zeitdauer der Induktionsströme eine sehr kurze ist, daß eine, wenn auch geringe Elektricitätsmenge doch sehr schnell durch den Körper hindurch entladen wird. Wenn bei gleicher Stromstärke ein Bündel von Eisendrähten stärkere Schläge giebt als ein massiver Eisenstab, so muß man schließen, daß im ersteren Falle dieselbe Elektricitätsmenge rascher durch den Körper entladen wird als im zweiten.

Der Extrastrom. Ist ein einzelnes Element durch einen kurzen Draht geschlossen, so erhält man bei Unterbrechung des Stromes nur einen schwachen Funken; einen Schlag erhält man dabei nicht. Wendet man aber statt des kurzen einen sehr langen, spiralförmig aufgewundenen Draht an, so sieht man beim Öffnen der Kette einen ungleich stärkeren Funken überspringen, und wenn man das eine Drahtende in der einen, das andere in der anderen Hand hält, so fühlt man im Momente des Öffnens einen Schlag. 241

Fig. 487.



Um solche Unterbrechungsschläge *einer einzigen Spirale* in rascher Aufeinanderfolge durch den Körper zu senden, kann man die in Fig. 487 angedeutete Anordnung anwenden. *S* ist die Spirale, *k* der galvanische Becher, *u* ist das Unterbrechungsrad. Die Handhaben sind angebracht, wie die Figur zeigt, so daß während der Unterbrechung des Hauptstromes der die Handhaben

fassende Körper den Schließungsbogen der Spirale bildet. Die Schläge bei den Unterbrechungen erklären sich folgendermaßen:

Wenn die Nebenspirale fehlt, so wirkt jede Windung der Hauptspirale induzierend auf die benachbarten; beim Schließen der Kette wird also in der stromleitenden Spirale selbst ein Strom induziert, welcher dem entstehenden Hauptstrome entgegengesetzt ist und deshalb gar nicht oder doch nur schwach zur Wirkung kommt. Beim Öffnen der Kette wird dagegen ein mit dem Hauptstrome gleich gerichteter Strom induziert, welchen Faraday mit dem Namen Extrastrom bezeichnet hat.

Auch die Schläge des Extrastromes werden wie die des gewöhnlichen Induktionsstromes dadurch bedeutend verstärkt, daß man Eisenstäbe oder noch besser Bündel von Eisendraht in die Höhlung der Spirale einlegt.

Man hat die Extraströme ebenso wie die in §. 240 besprochenen und in §. 247 noch zu besprechenden Induktionsströme vielfach zu medizinischen Zwecken und zu physiologischen Untersuchungen in Anwendung gebracht.

242 **Funkeninduktoren.** Nach den kräftigen physiologischen Wirkungen, welche mit Hülfe von Eisendrahtbündeln durch Induktionsapparate hervorgebracht werden, ließ sich erwarten, daß die Induktionsströme bei zweckmäßiger Konstruktion der Apparate eine hinlängliche Spannung erlangen würden, um zwischen den genäherten Drahtenden der nicht geschlossenen Induktionsspirale in Form von Funken überzuspringen.

Sinsteden ist es (1846) zuerst gelungen, durch Vermehrung und durch möglichst vollständige Isolierung der Drahtwindungen der Induktionsspirale Funkeninduktoren, d. h. solche Induktionsapparate zu konstruieren, welche elektrische Funken zu liefern im Stande waren. Ruhmkorff hat die Funkeninduktoren, welche nach ihm auch Ruhmkorff'sche Apparate, Fig. 488, genannt werden, vergrößert und verbessert; man unterscheidet an denselben: den Induktor, den Stromwender und den Unterbrecher.

Der Induktor. Derselbe bezweckt die Erregung der Induktionsströme und besteht aus zwei koncentrisch in einander geschobenen Drahtrollen (von 35 bis 65 cm Länge und 16 bis 24 cm Durchmesser). Die innere Rolle dient als induzierende und liegt um eine Pappröhre, deren Hohlraum mit einem Bündel ausgeglühter Eisendrähte angefüllt ist; sie besteht aus 100 bis 300 Windungen eines dicken Kupferdrahtes, dessen Enden bei a und b sichtbar sind. Die äußere Rolle, welche als Induktionsrolle dient, liegt um eine Glasröhre, die über die induzierende Rolle geschoben ist, und besteht aus den Windungen eines haarfeinen 20 bis 100 km langen Kupferdrahtes, welcher in die Klemmschrauben F und G endigt. Der vollkommenen Isolierung wegen sind nicht allein die Drähte der beiden Rollen mit Seide übersponnen und gefirnißt, sondern auch die Drahtlagen sind durch Schichten von geschmolzenem Schellack oder durch dünne Blätter von Guttapercha von einander getrennt. Die Rollen selbst werden durch zwei dicke Glasplatten zusammengehalten, von denen jede in der Mitte eine Öffnung hat, aus welcher das Drahtbündel etwas hervorragt.

Der Stromwender. Derselbe dient zur bequemen Unterbrechung und Umkehrung des induzierenden Stromes und besteht aus einer Walze *N* von

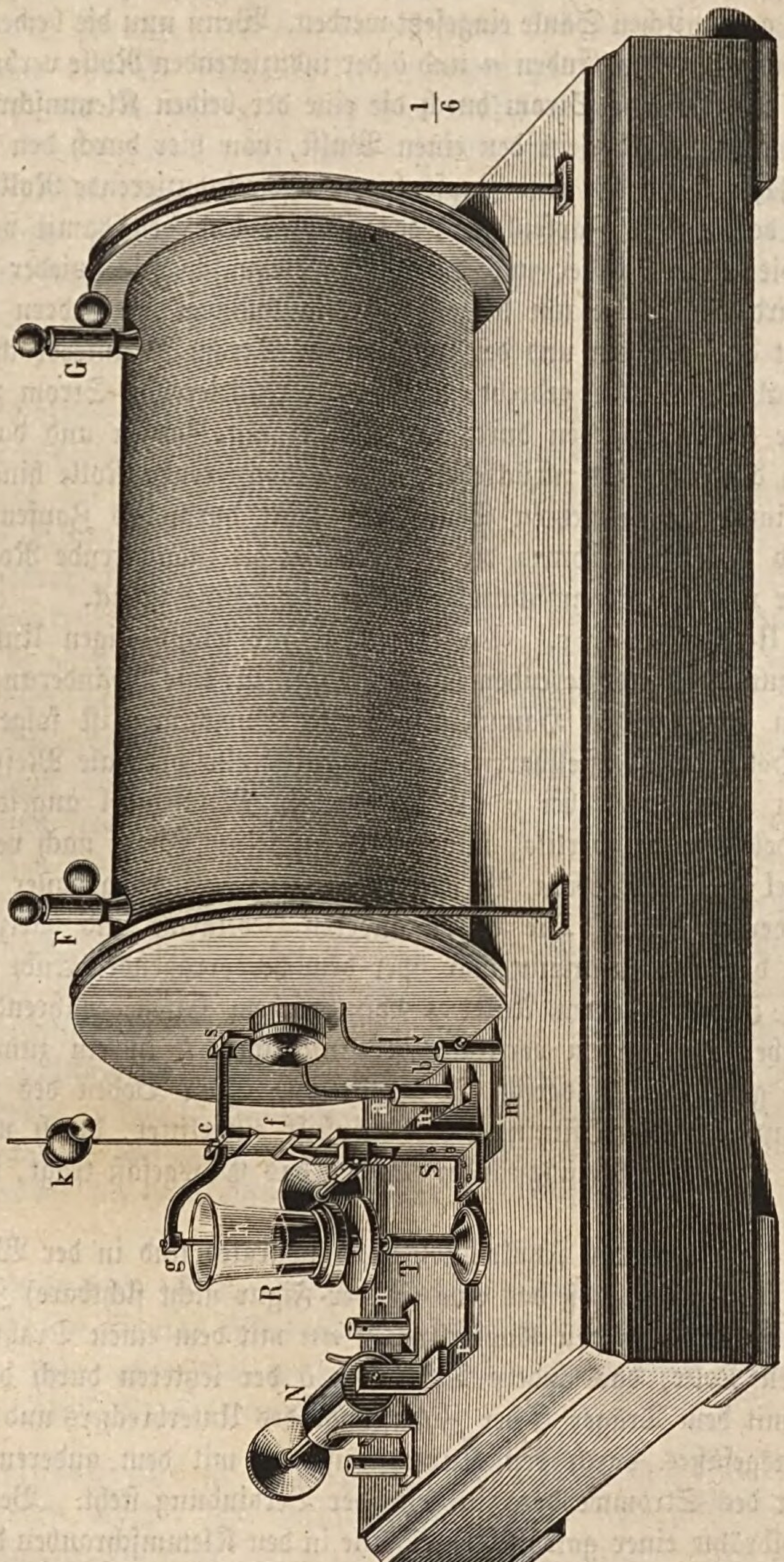


Fig. 488. 1/6

Hartgummi, die sich mittels eines Handgriffs um zwei Stahlzapfen auf Messing- lagern drehen läßt. Auf der Walze sind zwei einander gegenüberliegende Wülste

von Kupfer befestigt, von denen jeder mit einem Zapfen der Walze in leitender Verbindung steht. Gegen die Seiten der Walze drücken zwei einander gegenüberstehende Kupferfedern, die an Klemmschrauben befestigt sind, in welche die Poldrähte einer galvanischen Säule eingesetzt werden. Wenn nun die beiden Messinglager der Walze mit den Enden *a* und *b* der induzierenden Rolle verbunden sind, so geht der induzierende Strom durch die eine der beiden Klemmschrauben und die daran befestigte Feder in den einen Wulst, von hier durch den damit verbundenen Zapfen und das eine Zapfenlager in die induzierende Rolle und kehrt dann durch das andere Zapfenlager, den Zapfen und den damit verbundenen Wulst in die andere Feder und durch die Klemmschraube wieder zur Säule zurück. Wird die Walze um 90° gedreht, so kommen die Federn außer Berührung mit den Wülsten und der induzierende Strom ist unterbrochen. Wird aber die Walze um 180° gedreht, so geht der induzierende Strom zwar durch die nämliche Feder, dagegen durch den Wulst, den Zapfen und das Zapfenlager, durch die er vorher zurückkehrte, in die induzierende Rolle hinein, durchläuft diese im entgegengesetzten Sinne und kehrt durch das Zapfenlager, den Zapfen und den Wulst, durch die er vorher in die induzierende Rolle eintrat, in die Feder und die Klemmschraube wieder zur Säule zurück.

Der Unterbrecher. Derselbe dient zur selbstthätigen Unterbrechung und Schließung des induzierenden Stromes und ist eine Abänderung des oben beschriebenen magnetischen Hammers. Seine Einrichtung ist folgende: Auf einer der Höhe nach verstellbaren Zahnstange ist eine vertikale Messingfeder *f* befestigt, an welche oben bei *c* ein dreiarmiger Metallhebel angeschraubt ist. Der eine Hebelarm ist vertikal und trägt eine seiner Länge nach verschiebbare Messingkugel *k*, durch deren Verschiebung die Schwingungsdauer der Feder verändert werden kann. Die beiden anderen Hebelarme sind horizontal; von diesen trägt der eine *cs* unmittelbar über dem hervorragenden Ende des Drahtbündels im Induktor einen Anker *s* von weichem Eisen, während von dem anderen Hebelarme *cg* ein vertikales Platinstäbchen *h* in ein zum Teil mit Quecksilber gefülltes Glasgefäß *R* hinabreicht. Der Boden des letzteren ist durchbohrt und in die Öffnung ein Platinstift eingekittet, durch welchen das Quecksilber mit dem Messingständer *T*, der das Glasgefäß trägt, in leitender Verbindung steht.

Diese drei Teile des Funkeninduktionsapparates sind in der Weise leitend miteinander verbunden, daß das eine (in der Figur nicht sichtbare) Zapfenlager des Unterbrechers durch den Kupferstreifen *nn* mit dem einen Drahtende *a* der induzierenden Rolle, das andere Drahtende *b* der letzteren durch den Kupferstreifen *m* mit dem Träger *S* der Zahnstange des Unterbrechers und der Träger *T* des Glasgefäßes durch den Kupferstreifen *r* mit dem anderen sichtbaren Zapfenlager des Stromwenders in leitender Verbindung steht. Befestigt man nun die Poldrähte einer galvanischen Säule in den Klemmschrauben des Stromwenders und stellt man diesen so, daß die Federn die kupfernen Wülste berühren, und geht der Strom aus dem Stromwender bei *a* in die induzierende Rolle, so kehrt er durch die Feder des Unterbrechers, den Platinstift, das Quecksilber

und den Stromwender wieder nach der Säule zurück. Durch den Strom wird das Drahtbündel des Induktors magnetisiert; infolge davon wird der Anker des Unterbrechers hinabgezogen und das Platinstäbchen aus dem Quecksilber herausgehoben. Nun ist der Strom unterbrochen, das Drahtbündel verliert seinen Magnetismus und die Feder des Unterbrechers zieht vermöge ihrer Elasticität den Anker zurück, so daß auch das Platinstäbchen wieder in das Quecksilber eintaucht. Der Strom ist jetzt wieder geschlossen, und das Spiel des Unterbrechers wiederholt sich. Bei den Schließungen und Öffnungen werden in der Induktionsrolle Ströme induziert, von denen namentlich die Öffnungsströme bei größeren Apparaten eine Dichtigkeit erlangen, wie sie mit keiner anderen Elektrisiermaschine erhalten werden kann.

Die Entladung der Induktionsströme. Die beiden Induk- 243
tionsströme zeigen bei ihrer Entladung ein ungleiches Verhalten, welches davon herrührt, daß der Öffnungsstrom eine kleinere Dauer aber größere Dichtigkeit hat als der Schließungsstrom. Sind die Enden der Induktionsrolle durch einen Schließungsdraht mit einander verbunden, so gehen die beiden Induktionsströme in dem Stromkreise einfach hin und her. Schaltet man ein Galvanoskop in denselben ein, so wird die Nadel desselben nur unbedeutend abgelenkt, weil die Wirkung des einen Stromes durch die des anderen aufgehoben wird. Ist aber die Leitung durch einen Zwischenraum unterbrochen, so werden die beiden Elektricitäten zwar gleichfalls gegen die Enden der Schließungsdrähte hingetrieben, die Entladung jedoch kann auf dreierlei Weise vor sich gehen. Ist der Widerstand zwischen den Enden der Schließungsdrähte nur klein, so entladen sich beide Induktionsströme zwischen ihnen; ist der Widerstand größer, so entladet sich nur der Öffnungsstrom zwischen den Enden, da er eine größere Dichtigkeit besitzt, während sich der Schließungsstrom rückwärts durch die Induktionsrolle ausgleicht; übersteigt endlich der Widerstand eine gewisse Grenze, so findet gar keine Entladung zwischen den Enden der Schließungsdrähte mehr statt, sondern beide Ströme werden rückwärts durch die Induktionsrolle ausgeglichen; dabei kann die isolierende Schicht zwischen den Drahtlagen der Rolle leicht durchbrochen und der Apparat bis zur gänzlichen Unbrauchbarkeit beschädigt werden.

Wirkungen der Induktionsströme. Die Wirkungen der 244
Induktionsströme stimmen mit denjenigen der Reibungselektricität überein; man unterscheidet daher auch hier: physiologische, chemische, mechanische, Wärme- und Lichtwirkungen.

Physiologische Wirkungen. Die Wirkungen der Induktionsströme auf den Körper von Menschen und Tieren sind so heftig, daß selbst die der kleineren Apparate kaum ertragen werden können. Ein Apparat von mittlerer Größe reicht hin, ein Kaninchen augenblicklich zu erschlagen, und von größeren Apparaten würde schon ein einziger Öffnungsstrom genügen, einen Menschen zu töten.

Chemische Wirkungen. Die chemischen Wirkungen sind doppelter Art; die einen treten nur an den Elektroden auf und sind rein elektrolytische Wirkungen, die anderen dagegen zeigen sich in der ganzen Bahn der Entladung und sind Wirkungen der entwickelten Wärme. So kann man z. B. bei einem Versuche über Wasserzersetzung, je nach der Form und dem Abstande der Platinelektroden und nach der Leitungsfähigkeit des angesäuerten Wassers, bald nur eine Funkenentladung, bald nur eine Wasserzersetzung beobachten, und zwar kann letztere selbst wieder so vor sich gehen, daß entweder an jeder Elektrode nur ein Gas, oder an beiden Elektroden beide Gase ausgeschieden werden.

Mechanische Wirkungen. Zum Nachweis der mechanischen Wirkungen bringt man den Körper, durch welchen der Entladungsschlag geführt werden soll, zwischen die beiden Messingstäbe des allgemeinen Ausladers (Fig. 422) und verbindet diese mit den Enden der Induktionsrolle. Bei dieser Anordnung lassen sich mit den Induktionsströmen dieselben mechanischen Wirkungen hervorbringen, welche die Reibungselektricität (Seite 394) hervorbringen kann.

Wärmewirkungen. Verbindet man die Enden der Induktionsrolle mit den Messingstäben des allgemeinen Ausladers und diese letzteren selbst wieder unter sich durch einen kurzen und sehr dünnen Eisendraht, so schmilzt dieser und brennt ab, sobald der Induktionsapparat in Thätigkeit gesetzt wird. — Schiebt man die Messingstäbe des Ausladers sehr nahe zusammen, so daß zwischen ihnen nur kurze Funken überschlagen, so werden leicht brennbare Körper, wie Leuchtgas, Weingeist, Schießbaumwolle, Hobelspäne, entzündet, sobald sie zwischen die beiden Stäbe gebracht werden.

Die zündende Wirkung des Induktionsfunkens wird mit Vorteil zur gleichzeitigen Sprengung mehrerer Minen angewendet. Zu diesem Zwecke verbindet man die Enden der Induktionsrolle mit sämtlichen Minen durch eine isolierte Leitung, welche in der Ladung einer jeden Mine eine kleine Unterbrechungsstelle hat. Wenn dann der Induktionsapparat in Thätigkeit gesetzt wird, so schlägt der Induktionsfunke an allen Unterbrechungsstellen gleichzeitig über und führt so die beabsichtigte Sprengung herbei.

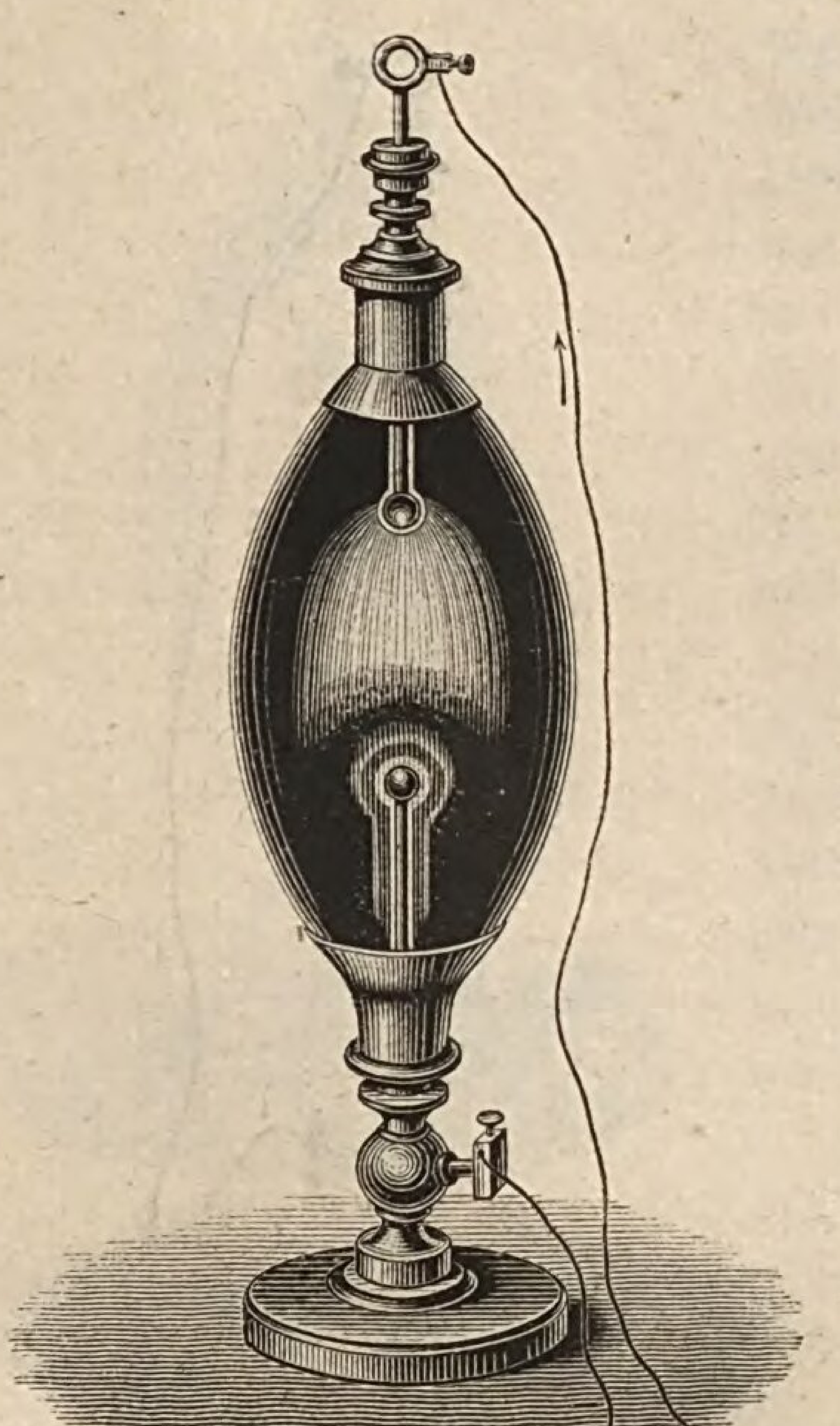
Lichtwirkungen. In Bezug auf die Lichtwirkungen der Induktionsströme unterscheidet man, wie bei der Reibungselektricität, eine Gasentladung und eine Metallentladung.

245 **Gasentladungen. Das elektrische Ei.** Um die Erscheinungen der Gasentladungen zu zeigen, kann man sich des schon §. 207 Seite 397 beschriebenen elektrischen Eies (Fig. 489) bedienen. Mit diesem Apparate lassen sich folgende bemerkenswerte Versuche ausführen:

Verbindet man die beiden Fassungen mit den Polen der Induktionsrolle, nachdem man vorher das Ei möglichst luftleer gemacht hat, so wird, wenn der Induktionsapparat in Thätigkeit gesetzt wird, jedesmal der Öffnungsstrom durch die im Ei noch vorhandene Luft entladen. Dabei beobachtet man, Fig. 489, daß sich ein violetter Lichtbüschel von dem positiven Pol

gegen den negativen hin ausbreitet, jedoch von diesem durch einen dunklen Zwischenraum getrennt bleibt, während der negative Pol ganz von blauem Glimmlicht bedeckt wird, das zwei durch einen dunklen Raum getrennte Schichten bildet. Die ungleiche Färbung des Glimmlichtes und des Büschellichtes an beiden Polen rührt davon her, daß der an der Entladung teilnehmende Stickstoff an dem positiven Pole eine höhere Temperatur besitzt als an dem negativen. Bei anderen Gasen, wie Sauerstoff, Wasserstoff, Kohlensäure, bestehen zwar auch dieselben Temperaturunterschiede an beiden Polen, jedoch sind die Färbungen des Büschellichtes und des Glimmlichtes weniger von einander verschieden.

Fig. 489.



Läßt man allmählich wieder Luft in das elektrische Ei ein, so nimmt das Büschellicht nach und nach die Gestalt einer Lichtlinie an; dabei wird der dunkle Raum zwischen den beiden Polen immer kleiner, und das blaue Glimmlicht zieht sich mehr und mehr auf die vordere Fläche des negativen Pols zurück.

Ist dagegen das elektrische Ei vollständig luftleer, so findet durch dasselbe hindurch keine Entladung mehr statt. Das Unvermögen des leeren Raumes, die Elektricität zu leiten, weist man am besten mittels eines Hittorf'schen Röhrchens nach; dasselbe besteht aus einer kurzen, völlig luftleeren Glasröhre, in welche zwei Platindrähte so eingeschmolzen sind, daß ihr Abstand in der Röhre weniger als 1 mm beträgt. Verbindet man die beiden Enden der Induktionsrolle mit den Platindrähten, so beobachtet man, daß die Induktionsfunken eher durch die äußere Luft als durch den kleinen luftleeren Raum zwischen den Platindrähten hindurchschlagen.

Berührt man das mit sehr verdünnter Luft gefüllte Ei mit einem Leiter, etwa mit dem Finger, Fig. 490 (a. f. S.), so findet an der Berührungsstelle eine elektrische Verteilung statt, vermöge welcher das Büschellicht nach der berührten Stelle hingezogen wird.

Enthält das elektrische Ei außer verdünnter Luft noch geringe Mengen von Terpentinöl-, Weingeist- oder Schwefelkohlenstoff-Dampf, so wird bei der Entladung das von dem positiven Pole ausgehende Büschellicht in eine Reihe heller mit dem Pole koncentrischer Schichten, Fig. 491, zerlegt, welche durch dunkle Streifen von einander getrennt sind; das Glimmlicht erscheint

gleichfalls geschichtet, der dunkle Zwischenraum zwischen dem Büschel- und dem Glimmlicht dagegen bleibt unverändert.

Fig. 490.

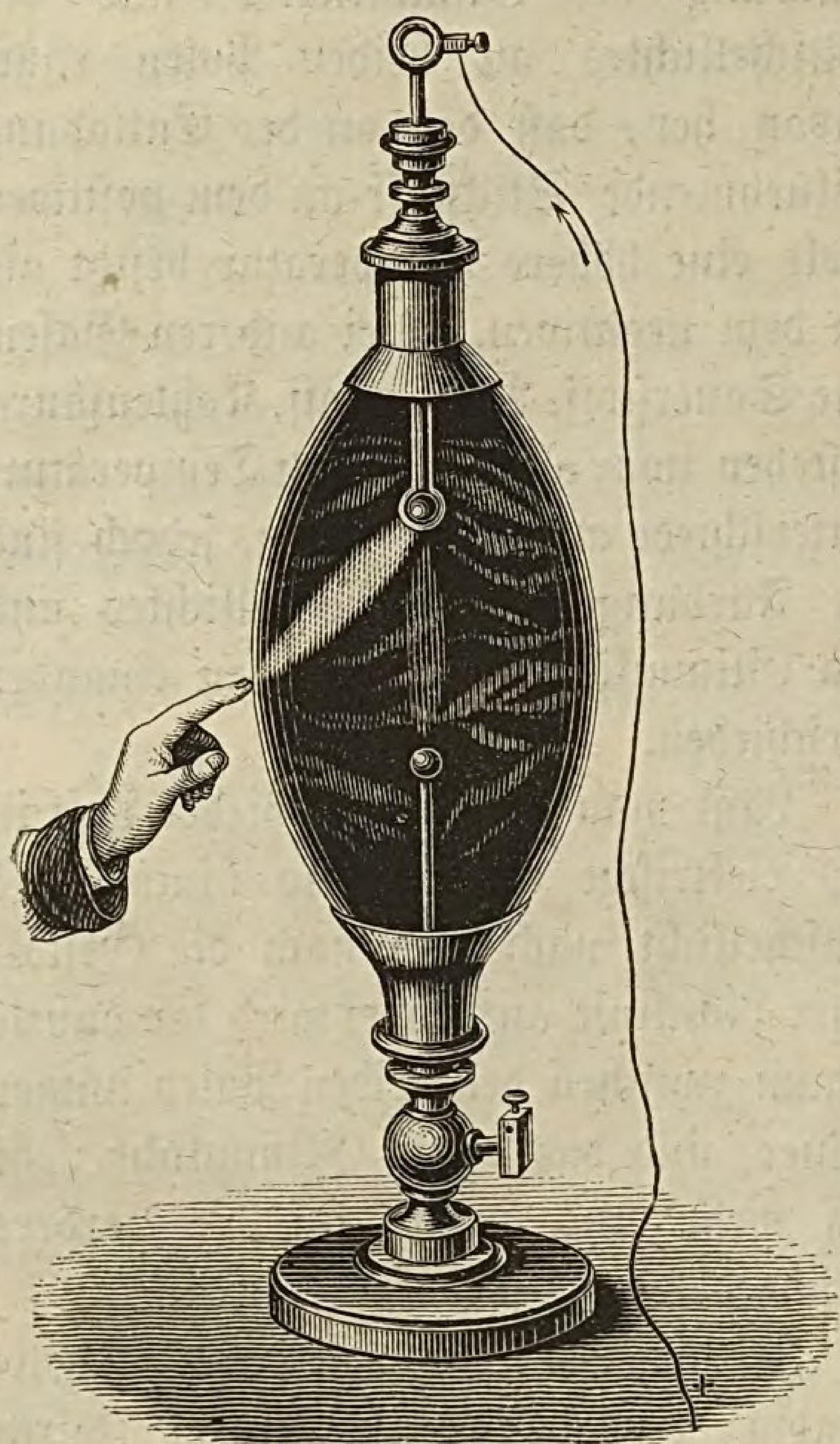
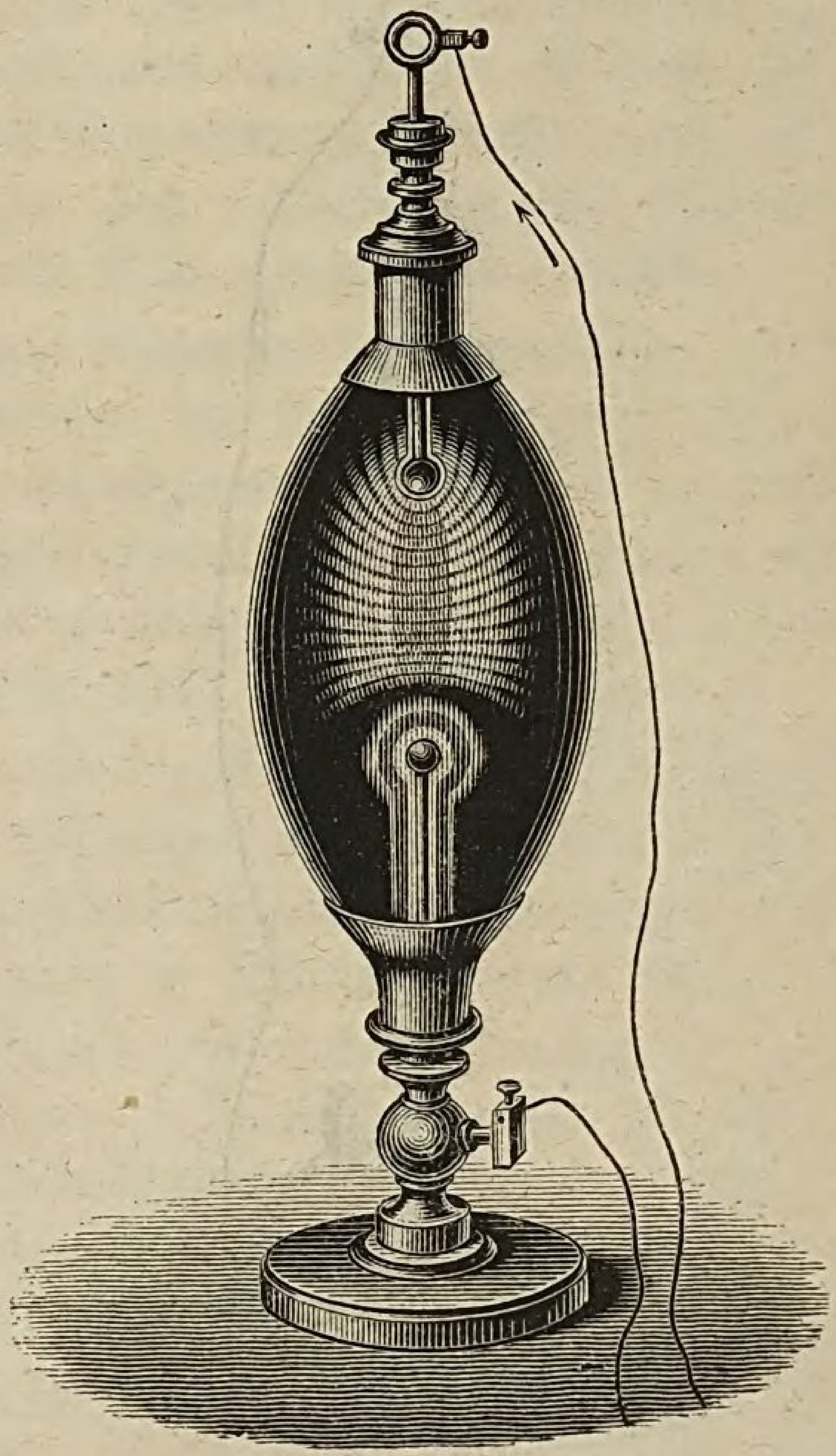


Fig. 491.

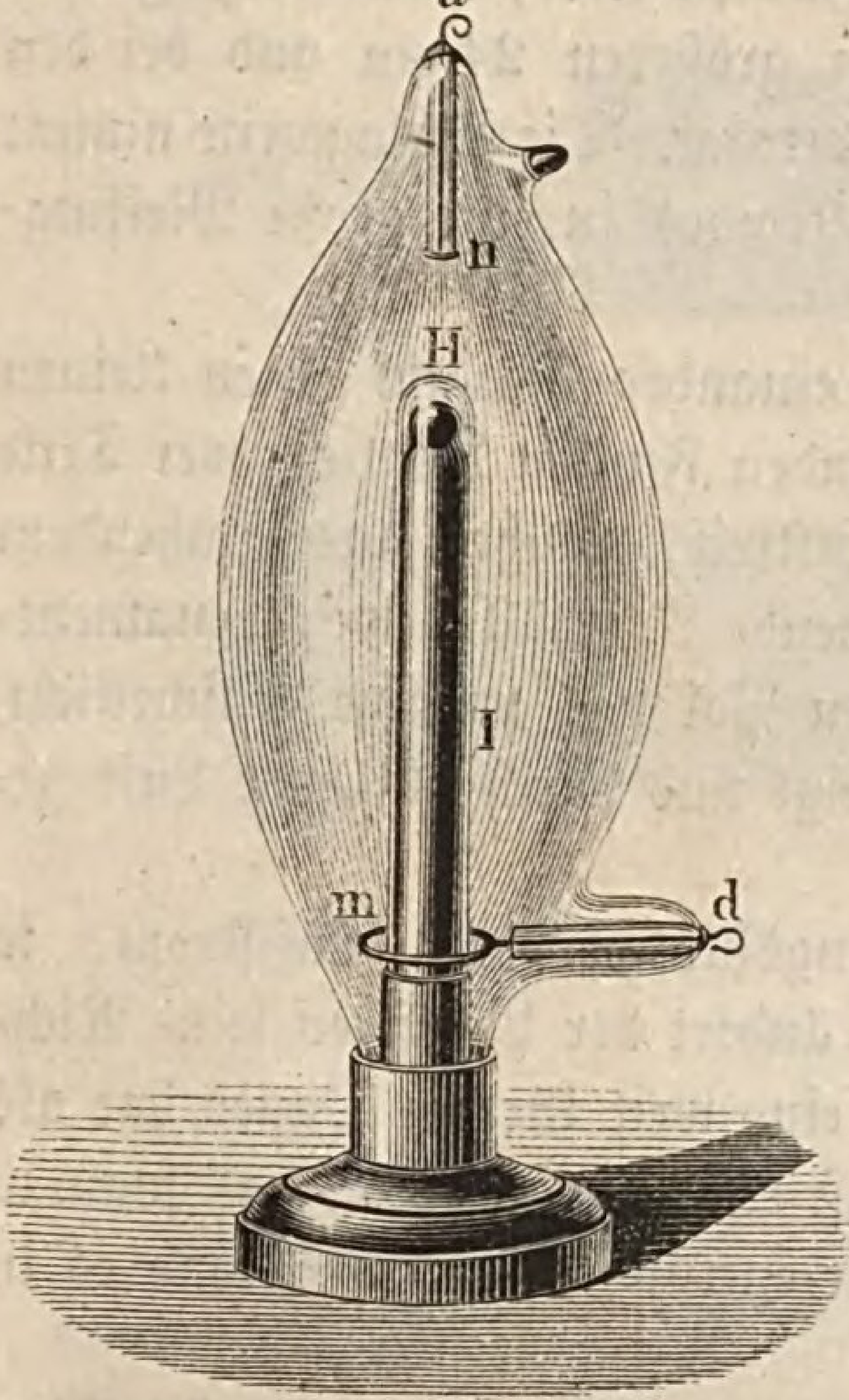


Der Entladungsstrom im luftverdünnten Raum verhält sich gerade wie ein galvanischer Strom in einem leicht beweglichen Leiter. Zum Nachweise dieses Satzes kann man sich des von Geißler konstruierten elektrischen Eies Fig. 492 bedienen. Dasselbe besteht aus einer nahezu luftleeren Glaskugel, in welche an zwei entgegengesetzten Punkten *a* und *b* Platindrähte eingeschmolzen sind, von denen der untere im Innern des Glasgefäßes zu einem Ringe *m* umgebogen ist. Unten in die Glaskugel ist eine oben verschlossene Glasröhre *H* eingeschmolzen, welche durch den Ring hindurchgeht und einen eingekitteten Eisenkern enthält. Stellt man diesen Apparat auf einen starken Magnetpol, so daß der Eisenkern magnetisiert wird, und verbindet man die Enden der beiden Platindrähte mit den Enden der Induktionsrolle, so dreht sich der zwischen den beiden Drähten übergehende Lichtbüschel um den magnetisierten Eisenkern in dem nämlichen Sinne wie sich nach §. 239 ein beweglicher Leiter um einen Magnet dreht.

Geißler'sche Röhren. Statt den luftverdünnten Raum im elektrischen Ei erst jedesmal mit der Luftpumpe herzustellen, kann man sich zu Versuchen über Gasentladungen der beinahe luftleeren Geißler'schen Röhren

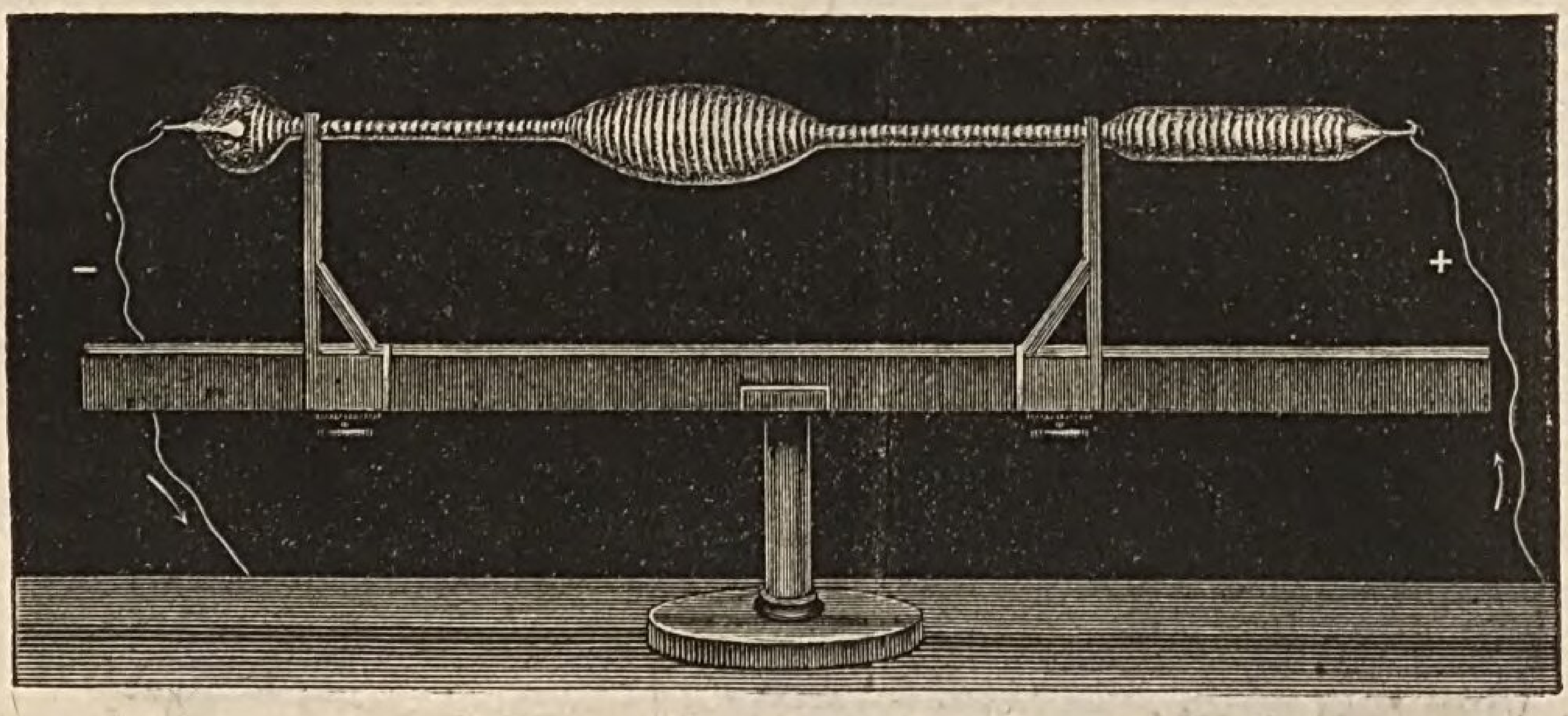
bedienen. Dieselben sind verschieden geformte Glasröhren (Fig. 493), in welche an beiden Enden Platindrähte eingeschmolzen sind. Diese Röhren werden mit verschiedenen Gasen gefüllt, hierauf möglichst luftleer gemacht und sodann zugeschmolzen. Verbindet man die Platindrähte solcher Röhren mit den beiden Drahtenden der Induktionsrolle, so beobachtet man im allgemeinen dieselben Erscheinungen wie im elektrischen Ei. Von dem positiven Pol geht ein Lichtbüschel aus, welches sich gegen den negativen Pol hin ausbreitet und die einzelnen Teile des Rohres je nach der geringeren oder größeren Weite mit mehr oder weniger hellem Licht erfüllt. Dieses Licht ist häufig von dunklen Querstreifen durchzogen. An dem negativen Pol erscheint das blaue Glimmlicht, welches sich gegen die Glaswände hin ausbreitet und von dem Büschellicht stets durch einen dunklen Raum getrennt ist.

Fig. 492.



Läßt man im Dunklen eine Geißler'sche Röhre sich senkrecht zu ihrer Länge umdrehen, so scheint dieselbe während der einzelnen Gasentladungen stillzustehen und sich nur während der Zwischenzeiten zu bewegen. Dies beweist, daß die

Fig. 493.



Gasentladungen in einer unmerklich kurzen Zeit erfolgen, während ihre Zwischenzeiten verhältnismäßig lang sind.

Noch verdient hier erwähnt zu werden, daß man mit Geißler'schen Röhren die Erscheinungen der Phosphorescenz und der Fluorescenz §. 153 in überraschend schöner Weise darstellen kann.

Metallentladungen. Um die Erscheinungen der Metallentladungen 246
hervorzubringen, kann man sich des allgemeinen Ausladers bedienen, indem

man die Messingstäbe desselben mit den Polen der Induktionsrolle verbindet. Die bemerkenswertesten Versuche sind:

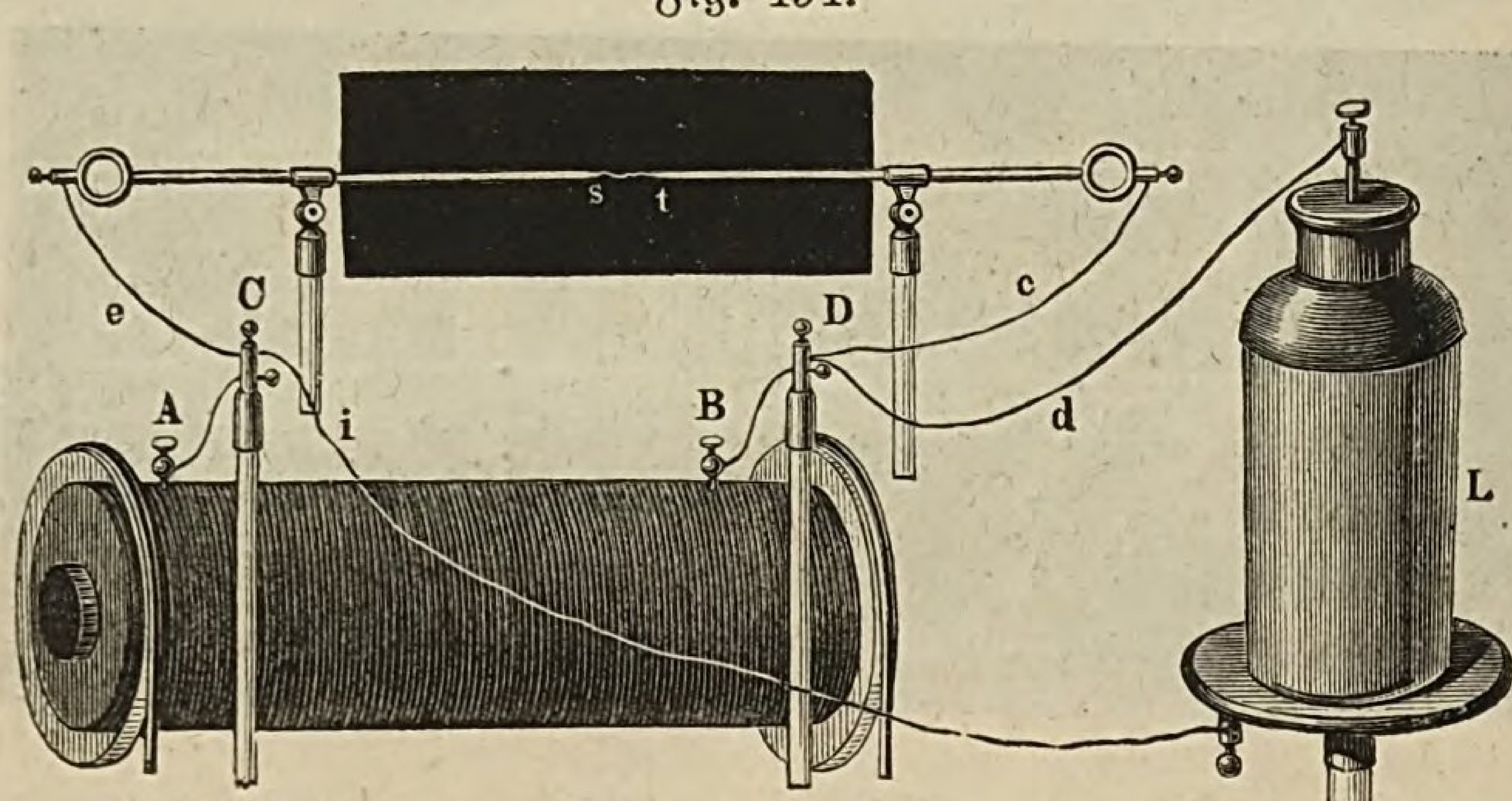
Sobald der Induktionsapparat in Thätigkeit gesetzt wird, springen zwischen den Metallspitzen des Ausladers kräftige Funken über, deren Schlagweite bei den kleinen Apparaten 6 bis 8 cm, bei den größeren 24 cm und bei den größten Ruhmkorff'schen Apparaten 45 cm beträgt. Die Schlagweite nimmt noch zu, wenn der negative Pol des Öffnungsstromes in eine große Messingscheibe endigt.

Nähert man die Spitzen des Ausladers einander bis auf einen kleinen Zwischenraum, so kann man in den überschlagenden Funken deutlich zwei Teile unterscheiden, nämlich einen helleuchtenden Lichtstreif, welcher aus glühendem Metalldampf besteht, und eine denselben umgebende Lichthülle, welche namentlich unter dem Vergrößerungsglas am positiven Pol das positive Büschellicht, am negativen dagegen das blaue Glimmlicht zeigt und durch glühende Luft gebildet wird.

Richtet man gegen die kurzen Entladungsfunken einen Luftstrom, so wird die Lichthülle seitwärts getrieben, dagegen ändert der Lichtstreif seine Richtung nicht. Dies beweist, daß der Lichtstreif eine weit kürzere Dauer hat als die Lichthülle. Damit stimmt auch überein, daß ein Blatt Papier, das man in den Lichtstreif hält, zwar durchlöchert aber nicht entzündet wird, während es in der Lichthülle sogleich zu brennen anfängt.

Verbindet man die Enden der Induktionsrolle außer mit den Messingstäben des Ausladers auch noch mit den Belegungen einer Leydner Flasche (Fig. 494), so wird die Elektricität in diesen angehäuft, bevor die Funken

Fig. 494.

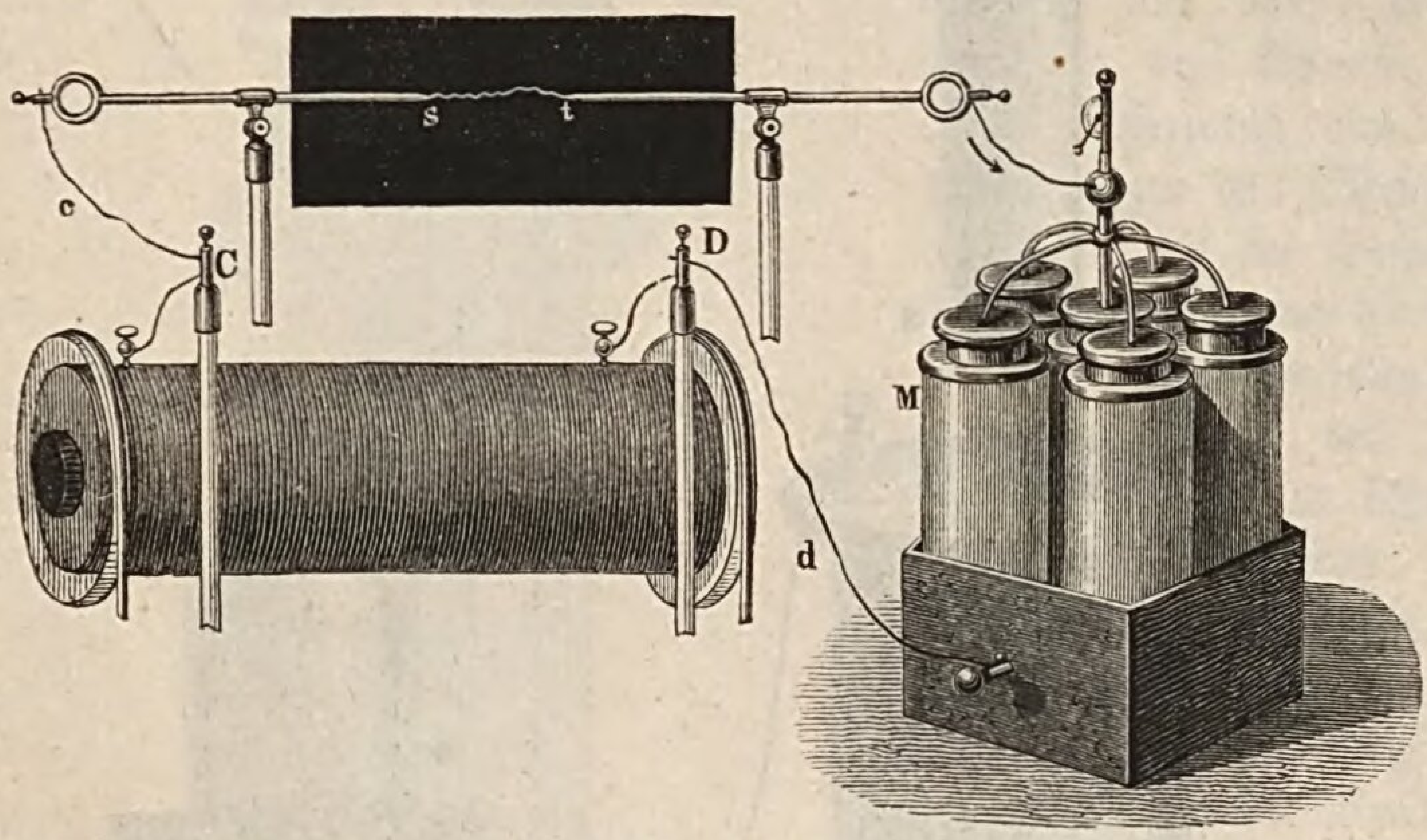


zwischen jenen überspringen. Die Funken sind dann kurz und ohne Lichthülle, dagegen von blendendem Glanze und verursachen ein knatterndes Geräusch. Diese Darstellungsweise der Funken wird bei der Untersuchung der Metallspektra (§. 152, Seite 298) angewendet.

Verbindet man das eine Ende der Induktionsrolle mit dem einen Metallstab des Ausladers (Fig. 495), das andere Ende mit der äußeren Belegung einer Leydner Batterie und die innere Belegung der letzteren mit dem

anderen Metallstab des Ausladers, so wird die Batterie durch den Öffnungsstrom geladen, wenn die beiden Spitzen des Ausladers soweit von einander abstehen, daß der Schließungsstrom zurückgehalten wird.

Fig. 495.



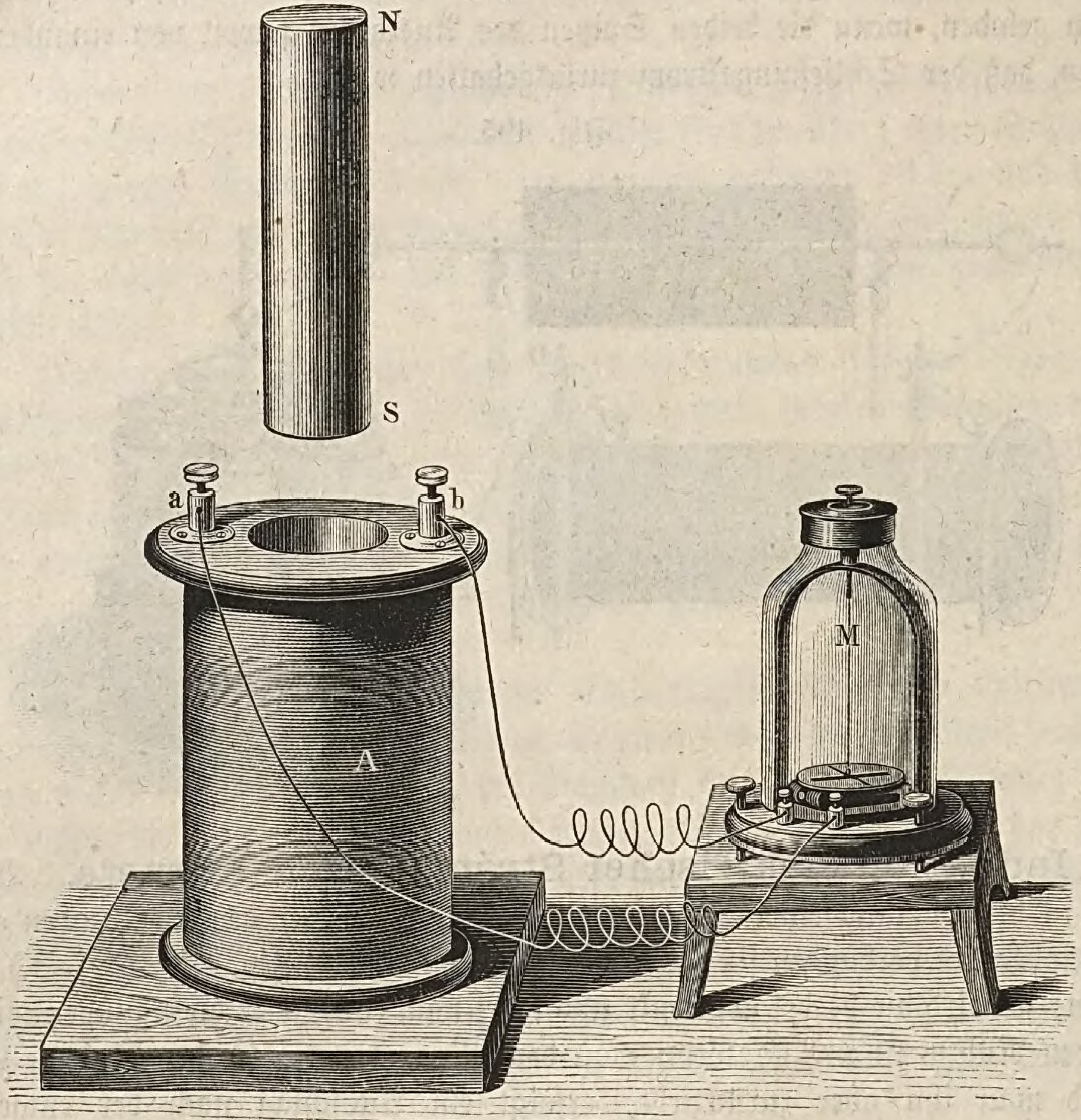
Induktion elektrischer Ströme durch Magnete. Wenn man in die Höhlung einer Drahtspirale, deren Enden mit den Drahtenden eines Multiplikators verbunden sind, einen Magnetstab NS, Fig. 496, (a. f. S.) einschiebt, so wird die Nadel abgelenkt und kehrt nach einigen Schwingungen wieder auf den Nullpunkt zurück, wenn man den Magnet ruhig in der Spirale läßt; sobald man ihn aber zurückzieht, erfolgt ein Ausschlag nach der entgegengesetzten Seite. 247

Es versteht sich von selbst, daß der Multiplikator hinlänglich weit entfernt sein muß, um nicht direkt durch die Bewegung des Magnetstabes affiziert zu werden. Die Richtung des Stromes, welche das Galvanometer bei der Annäherung des Magnets anzeigt, ist der Richtung der Ströme entgegengesetzt, welche nach der Ampère'schen Theorie den Magnet umkreisen; der bei der Entfernung des Magnets im Drahte induzierte Strom hat mit diesen Molekularströmen gleiche Richtung.

Man kann den Versuch auch dahin abändern, daß man die Höhlung der Spirale A, Fig. 496, durch einen massiven Kern von weichem Eisen ausfüllt und diesem dann von oben her einen Magnetstab nähert und ihn dann wieder zurückzieht. Durch den in dem Eisenkern abwechselnd entstehenden und verschwindenden Magnetismus werden Ströme in der Spirale A induziert.

Selbst durch den Erdmagnetismus können Ströme induziert werden. Wenn man einen Stab von weichem Eisen, der mit einer Drahtspirale umgeben ist, in die Richtung der Inklinationsnadel hält, und ihn dann samt der ihn umgebenden Spirale um eine zum magnetischen Meridian senkrechte Achse rasch rotieren läßt, so wird in der Spirale bei jeder halben Umdrehung ein Strom induziert.

Fig 496.

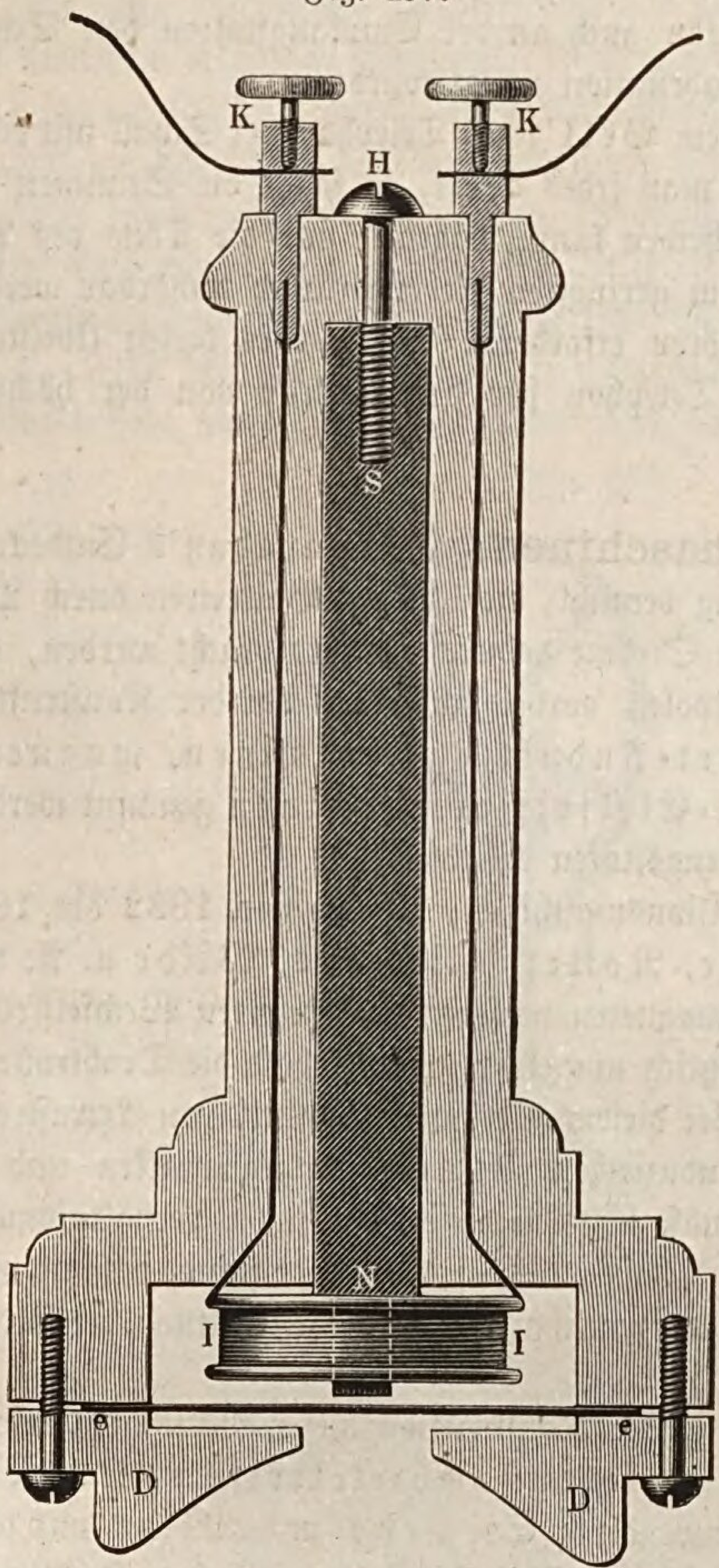


248 **Das Telephon.** Mit diesem Namen bezeichnet man Apparate, mittels deren der Schall durch elektrische Ströme auf große Entfernungen übertragen wird. Das erste Telephon wurde von Ph. Reis in Friedrichsdorf bei Frankfurt a. M. im Jahre 1861 konstruiert; mit demselben konnte man jedoch nur Töne und Melodieen auf eine Entfernung von höchstens 100 m fortpflanzen. Einen weit vollkommeneren Apparat erfand A. Graham Bell in Boston im Jahre 1877, mittels dessen man jede Art von Schall, ja selbst gesprochene Worte in Entfernungen von einigen hundert Kilometern wiedergeben kann.

Das Bell'sche Telephon besteht aus einem Magnetstabe *NS*, Fig. 497, welcher an dem einen Ende mittels einer starken Schraube *H* in einem hölzernen Gehäuse befestigt, an dem anderen Ende aber zu einem dünnen Cylinder abgedreht ist. Auf diesem cylindrischen Ende ist eine Rolle *II* aufgesteckt, aus welcher das Ende des Magnets noch ein wenig hervorragt; auf die Rolle selbst ist mit Seide übersponnener Kupferdraht aufgewunden, welcher durch das Holzgehäuse hindurch nach den beiden Klemmschrauben *KK* führt. Ganz nahe vor dem abgedrehten Ende des Magnets befindet sich ein dünnes kreisförmiges Eisenplättchen *ee*, dessen Rand durch einen Deckel *DD*, welcher in seiner Mitte eine flach trichterförmige Öffnung hat, mittels Holzschrauben auf das Gehäuse angepreßt wird.

Um zwischen zwei Stationen einen telephonischen Verkehr herzustellen, verbindet man dieselben durch eine Telegraphenleitung und schaltet in diese an jeder Station ein Telephon ein. An der Abgangstation spricht man langsam und ohne Überanstrengung der Stimme aus einer Entfernung von etwa 10 cm gegen das Eisenplättchen hin; auf der Empfangstation dagegen, wo die vollkommenste Ruhe herrschen muß, wird der Deckel des Telephons dicht an das Ohr gehalten, worauf man dann deutlich aber sehr leise das Gesprochene vernimmt.

Fig. 497.



Die Fortpflanzung des Schalles durch das Bell'sche Telephon erklärt sich auf folgende Weise. Wird gegen das Eisenplättchen hin gesprochen, so schwingt es, wie das Trommelfell des Gehörorgans, hin und her und zwar abwechselnd gegen die Drahtrolle hin und wieder von derselben hinweg. Das Eisenplättchen befindet sich aber auch in der Nähe eines Magnetpoles und ist deshalb selbst ein Magnet, dessen Südpol auf der inneren, der Nordpol dagegen auf der äußeren Seite liegt, wenn der Magnetpol innerhalb der Drahtrolle ein Nordpol ist. Nach dem Gesetze der Magnetinduktion bringt nun jede Schwingung des Plättchens zwei Ströme in der Drahtrolle hervor, von denen derjenige, welcher bei der Annäherung des Plättchens entsteht, von diesem aus betrachtet, die Drahtrolle im Sinne eines Uhrzeigers durchläuft, der andere bei der Entfernung des Plättchens entstehende sich im entgegengesetzten Sinne bewegt.

Diese abwechselnd entgegengesetzt gerichteten Ströme gelangen durch die Leitung in die Drahtrolle des Telephons an der Empfangstation und umkreisen den innerhalb der Rolle befindlichen Magnetpol, wodurch der Magnetismus desselben abwechselnd verstärkt und geschwächt wird. Infolge davon wird aber

auch das vor dem Magnetpole befindliche Eisenplättchen abwechselnd stärker und schwächer angezogen und schwingt daher vermöge seiner Elasticität hin und her. Die Eisenplättchen an beiden Stationen schwingen somit in übereinstimmender Weise; folglich wird man auch an der Empfangstation den Schall so empfinden, wie er an der Aufgabestation erregt wurde.

In der That läßt sich mit dem Bell'schen Telephon der Schall mit einer solchen Schärfe fortpflanzen, daß man jedes Wort, ja sogar die Stimmen der Sprechenden von einander unterscheiden kann; dagegen sind die Töne des Apparates so schwach, daß sie bei dem geringsten Nebengeräusch unhörbar werden und mehr ein Horchen als ein Hören erfordern. Gelingt es diesen Übelstand noch zu beseitigen, so wird das Telephon für den Verkehr von der höchsten Bedeutung werden.

249 **Magnet-Induktionsmaschinen.** Seit Faraday's Entdeckung der Induktion war man unablässig bemüht, die lästigen Batterieen durch Maschinen zu ersetzen, in denen die Ströme dadurch hervorgebracht werden, daß Drahtrollen an kräftigen Magnetpolen vorbei rotieren. In der Konstruktion dieser Maschinen, welche Magnet-Induktionsmaschinen, magneto-elektrische oder auch Magnet-Elektrisiermaschinen genannt werden, lassen sich folgende drei Entwickelungsstufen erkennen.

Die ältesten Magnet-Induktionsmaschinen, wie sie von 1832 bis 1867 von Pixii, Clarke, Stöhrer, Nollet, Siemens, Wilde u. A. konstruiert wurden, waren mit Stahlmagneten versehen und lieferten Wechselströme, d. h. Ströme, deren Richtung plötzlich umgekehrt wird, sobald die Drahtrolle an einem Magnetpole vorbeigeht. Bei diesem Stromwechsel entstehen Extraströme, welche den durch den Magnet induzierten Strömen entgegenwirken und die Stromstärke schwächen. Demgemäß bringen diese Maschinen verhältnismäßig nur geringe Wirkungen hervor und haben den weiteren Übelstand, daß sie eines Kommutators bedürfen, wenn in der von ihnen ausgehenden Leitung die Ströme gleiche Richtung erhalten sollen.

Der bedeutendste Fortschritt in der Konstruktion dieser Maschinen erfolgte im Jahre 1866 durch die Entdeckung des dynamo-elektrischen Princips von Siemens, durch dessen Anwendung Siemens und Wilde mit ihren Maschinen Ströme von bisher unbekannter Stärke erzielten. Nach diesem Princip werden statt der Stahlmagnete Elektromagnete angewendet, welche durch einmaliges Magnetisieren mittels eines Batteriestromes zu schwachen permanenten Magneten geworden sind. Wird eine solche dynamo-elektrische Maschine, nachdem ihr Stromkreis geschlossen ist, in Bewegung gesetzt, so kann ihr Strom nur sehr schwach sein, weil ja auch der induzierende Magnet nur sehr schwach ist. Schaltet man aber die Drahtrollen des Elektromagnets derart in den Stromkreis ein, daß die induzierten Ströme den Magnet im gleichen Sinne umkreisen, in welchem er nach der Ampère'schen Theorie von seinen Molekularströmen umkreist wird, so wird sein Magnetismus verstärkt, durch diesen verstärkten Magnetismus aber werden wieder stärkere Ströme induziert. Es findet somit eine

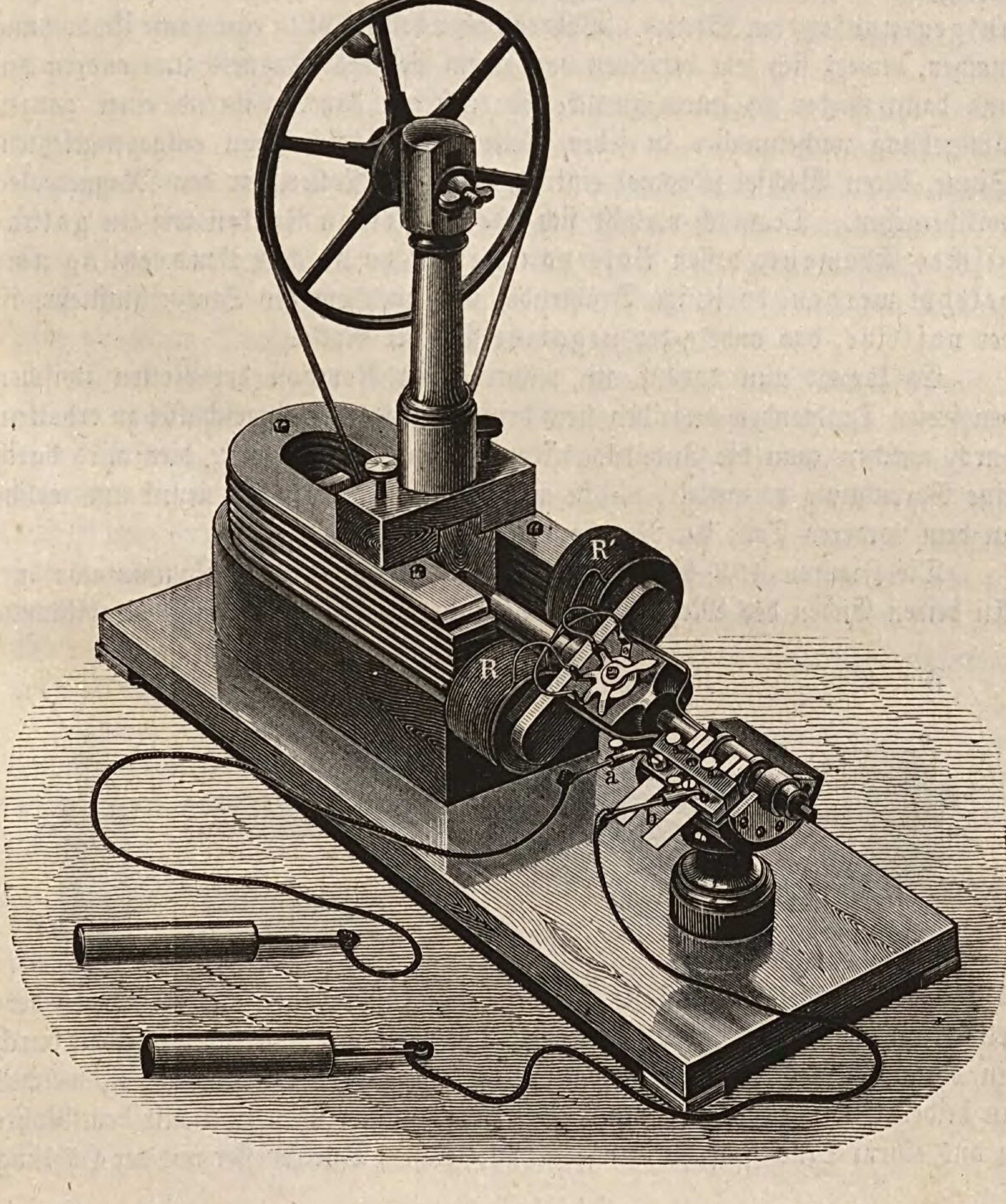
gegenseitige Verstärkung des Magnetismus und der Ströme statt, welche so lange zunimmt, bis die Widerstände, welche der Bewegung der Maschine entgegenwirken, eine solche Höhe erreichen, daß sie der treibenden Kraft das Gleichgewicht halten.

Die letzte wesentliche Verbesserung der Magnet-Induktionsmaschinen verdankt man dem belgischen Mechaniker Gramme durch die Erfindung des Ring-Induktors (1871), durch dessen Anwendung die Wechselströme beseitigt und nur noch gleichgerichtete Ströme gewonnen werden.

Wir gehen nun über zur näheren Beschreibung und Erklärung der Magnetinduktionsmaschinen und wählen als Beispiele die Maschine von Stöhrer mit Wechselströmen und die Gramme'sche Maschine mit Stahlmagneten.

1. Die Magnet-Induktionsmaschine von Stöhrer, Fig. 498. Dieselbe besteht aus einem wagerechten und aus mehreren Lamellen zusammen-

Fig. 498.



gesetzten Hufeisenmagnet, zwischen dessen Schenkeln die Rotationsachse angebracht ist, um die sich die Induktionsrollen drehen. Die Umdrehung dieser Achse wird durch einen Schnurlauf bewirkt, welcher von einer größeren oberhalb befindlichen Drehscheibe über eine kleinere auf der Achse sitzende Rolle geht.

Die beiden Enden dieser eisernen Umdrehungsachse laufen in Spitzen. Auf der vorderen Hälfte derselben ist eine eiserne Platte befestigt, welche, gegen die Magnetpole gekehrt, zwei Cylinder von weichem Eisen trägt, auf denen die Induktionsspiralen *R* und *R'* aufgesteckt sind.

Wird nun die Maschine in Gang gesetzt, so entfernt sich abwechselnd die eine Induktionsrolle vom Südpol und nähert sich dem Nordpol, während die andere sich vom Nordpol entfernt und dem Südpol nähert. Dadurch wird in jeder der beiden Rollen ein Strom induziert, welcher sich in ersterer im gleichen Sinne, in letzterer aber im entgegengesetzten Sinne eines Uhrzeigers bewegt; die Induktionsströme in beiden Rollen sind somit stets von entgegengesetztem Sinne. Während aber beide Rollen eine ganze Umdrehung machen, bewegt sich jede derselben von einem Pol des Magnets zum andern hin und dann wieder zu jenem zurück; es entstehen daher während einer ganzen Umdrehung nacheinander in jeder Rolle zwei Ströme von entgegengesetztem Sinne, deren Wechsel jedesmal eintritt, wenn die Rollen vor den Magnetpolen vorübergehen. Demnach verhält sich jede der beiden Rollen wie ein galvanisches Element, dessen Pole von halber zu halber Umdrehung umgekehrt werden; dasjenige Drahtende, nach welchem der Strom hinfließt, ist der positive, das andere der negative Pol der Rolle.

Es kommt nun darauf an, während der Rotation der Rollen zwischen den freien Drahtenden derselben stets denjenigen Körper eingeschaltet zu erhalten, durch welchen man die Induktionsströme hindurchsenden will; dies wird durch eine Vorrichtung vermittelt, welche man den Kommutator nennt und welche an dem vorderen Teile der Rotationsachse befestigt ist.

Die Figuren 499 bis 501 stellen den Stöhrer'schen Kommutator dar. An beiden Enden des Messingrohres *m* sind zwei halbkreisförmige Stahlkämme

Fig. 499.

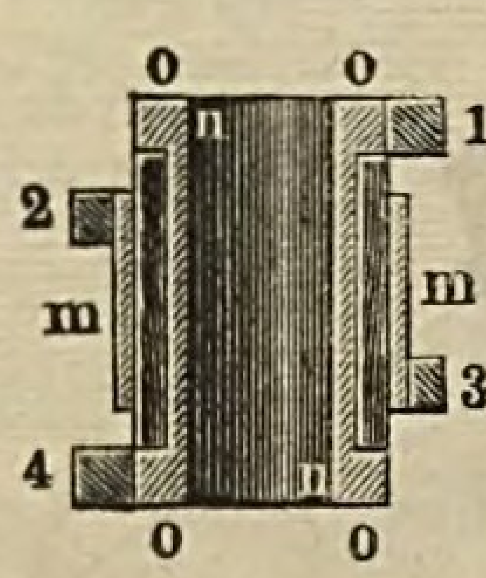


Fig. 500.

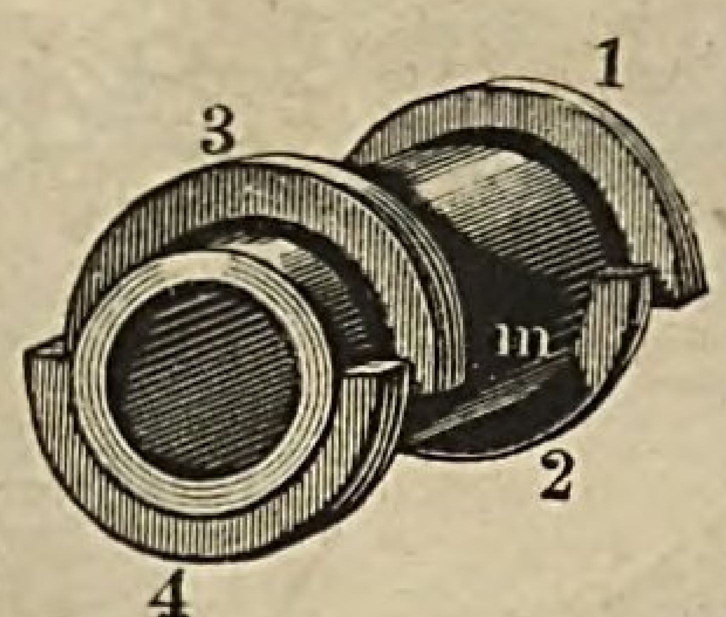
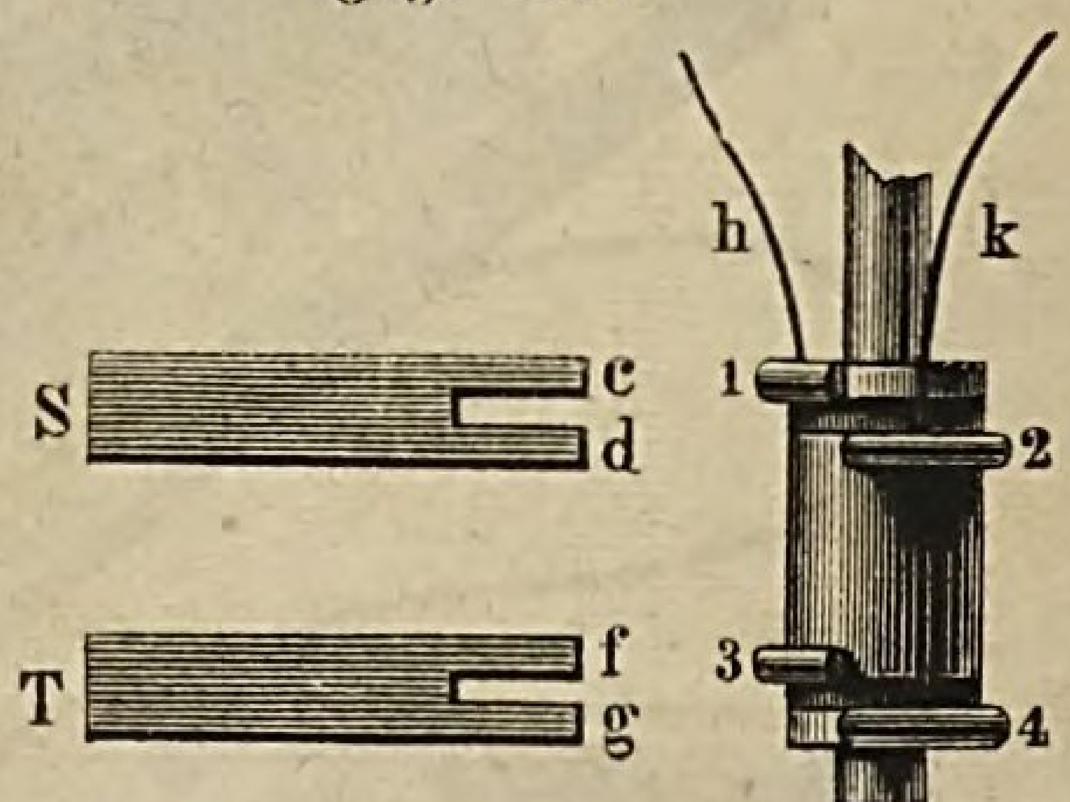


Fig. 501.



2 und 3 so angelötet, daß sie sich genau gegenüberliegen und die Enden derselben sich etwas überragen. Innerhalb des Rohres *m* und von demselben durch ein dünnes Buchsbaumrohr getrennt, steckt ein zweites Messingrohr *n*, welches an beiden Enden etwas übersteht. Die Vorsprünge tragen zwei mit dem Rohre *n* aus einem Stück gedrehte Ringe *o* von gleichem Durchmesser mit der Höhlung

des Rohres *m*; auf diese Ringe sind die Stahlkämme 1 und 4 den Stahlkämmen 3 und 2 korrespondierend aufgelötet, wie man dies am deutlichsten in Fig. 501 sieht.

Dieses ganze System ist auf der Umdrehungsachse befestigt.

Das eine Drahtende *k*, Fig. 501, der Spiralen führt zum Kamm 2, das andere Drahtende *h* führt zum Kamm 1.

An dem Gestelle der Maschine sind zwei flache, dünne Stahlfedern so angebracht, daß ihre vorderen geschlitzten Enden die Stahlkämme von oben fest berühren; sie können nach Belieben mittels einer Schraube mehr oder weniger gespannt werden.

Der leichteren Übersicht wegen sind in Fig. 501 die beiden Federn etwas von der Walze abgerückt gezeichnet. Die Feder *S* teilt sich in die Gabeln *c* und *d*; die Feder *T* teilt sich in die Gabeln *f* und *g*.

Mit der Feder *S* ist die Klemmschraube *a*, Fig. 498, mit *T* ist *b* in leitender Verbindung. Zwischen *a* und *b* werden die Körper eingeschaltet, durch welche man die Induktionsströme hindurchsenden will.

In der Stellung, welcher Fig. 501 entspricht, schleift *d* auf 2, *g* auf 4, während *c* und *f* frei sind. Wenn nun aber 2 von *k* die positive Elektricität aufnimmt, während 4 mit dem negativen Drahtende *h* in leitender Verbindung steht, so cirkuliert der positive Strom in folgender Weise durch den Apparat: Von *k* geht er durch den Kamm 2 und die Gabel *d* zur Klemmschraube *a*, von dieser durch den eingeschalteten Leiter nach *b*, um über *g* und den Kamm 4 zum negativen Drahtende *h* der Spirale zu gelangen.

Dreht sich nun die Achse für einen vorn stehenden Beschauer wie der Zeiger einer Uhr, so wird alsbald der Kamm 2 die Gabel *d* und der Kamm 4 die Gabel *g* verlassen, während *c* auf 1 und *f* auf 3 zu liegen kommt; der Kommutator ist aber so gestellt, daß dieser Wechsel gleichzeitig mit dem Wechsel der Stromrichtung in den Spiralen stattfindet, so daß also in diesem Momente *h* das positive und *k* das negative Drahtende der Spiralen wird; es geht also der positive Strom jetzt von *h* auf 1, von da durch *c* nach *a* u. s. w.; es wird also auch jetzt der positive Strom den zwischen den Klemmschrauben eingeschalteten Körper noch in der Richtung von *a* nach *b* durchlaufen.

Durch den Stöhrer'schen Kommutator wird also bewirkt, daß der Induktionsstrom durch den zwischen *a* und *b* eingeschalteten Körper stets in gleicher Richtung hindurchgeht, obgleich die Stromrichtung in den Spiralen mit jeder halben Umdrehung sich ändert.

Während der Rotation der Spiralen nehmen die in ihnen induzierten Ströme allmählich ab und zu; langsam wachsende Ströme bringen aber keine starke physiologische Wirkung, wohl aber alle anderen Wirkungen des galvanischen Stromes hervor.

Schraubt man in die Klemmschrauben *a* und *b* die Drahtenden eines Elektromagnets ein, so wird dieser durch die Induktionsströme magnetisiert; die Nadel einer zwischen *a* und *b* eingeschalteten Tangentenbussole zeigt, da die Ströme sie stets im gleichen Sinne umkreisen, bei einigermaßen schneller Dre-

hung eine konstante Ablenkung. Auch findet in einem zwischen *a* und *b* eingeschalteten Voltameter Wasserzersetzung statt, und zwar wird das Sauerstoffgas stets an der einen, das Wasserstoffgas stets an der anderen Platte ausgeschieden.

Will man mit dem Rotationsapparate physiologische Schläge hervorbringen, so muß für eine momentane Unterbrechung des Hauptstromes gesorgt sein. Dies geschieht beim Stöhrer'schen Kommutator dadurch, daß die Kämme etwas übereinandergreifen, wie dies in Fig. 500 etwas übertrieben gezeichnet ist. Dadurch wird bewirkt, daß bei jeder halben Umdrehung einmal auf ganz kurze Zeit alle vier Kämme des Kommutators an den Federn schleifen, so daß für diese Zeit die Kette direkt durch die Federn geschlossen ist und kein Strom durch den Schließungsbogen geht, welcher zwischen den Klemmschrauben *a* und *b* eingeschaltet ist. Dieser also im Apparate selbst zurückkehrende Strom ist ziemlich stark, weil er außer dem Leitungswiderstande in den Spiralen keinen Leitungswiderstand im Schließungsbogen zu überwinden hat, und in dem Augenblicke, wo nur zwei Kämme ihre Federn verlassen, wo also dieser direkte Strom unterbrochen wird, entsteht infolge dieser Stromunterbrechung in den Spiralen ein Extrastrom, welcher in dem zwischen *a* und *b* mittels Handgriffen eingeschalteten menschlichen Körper einen heftigen Schlag hervorbringt. Diesen Schlag erhält also der Körper zweimal bei jeder Umdrehung der Rotationsachse.

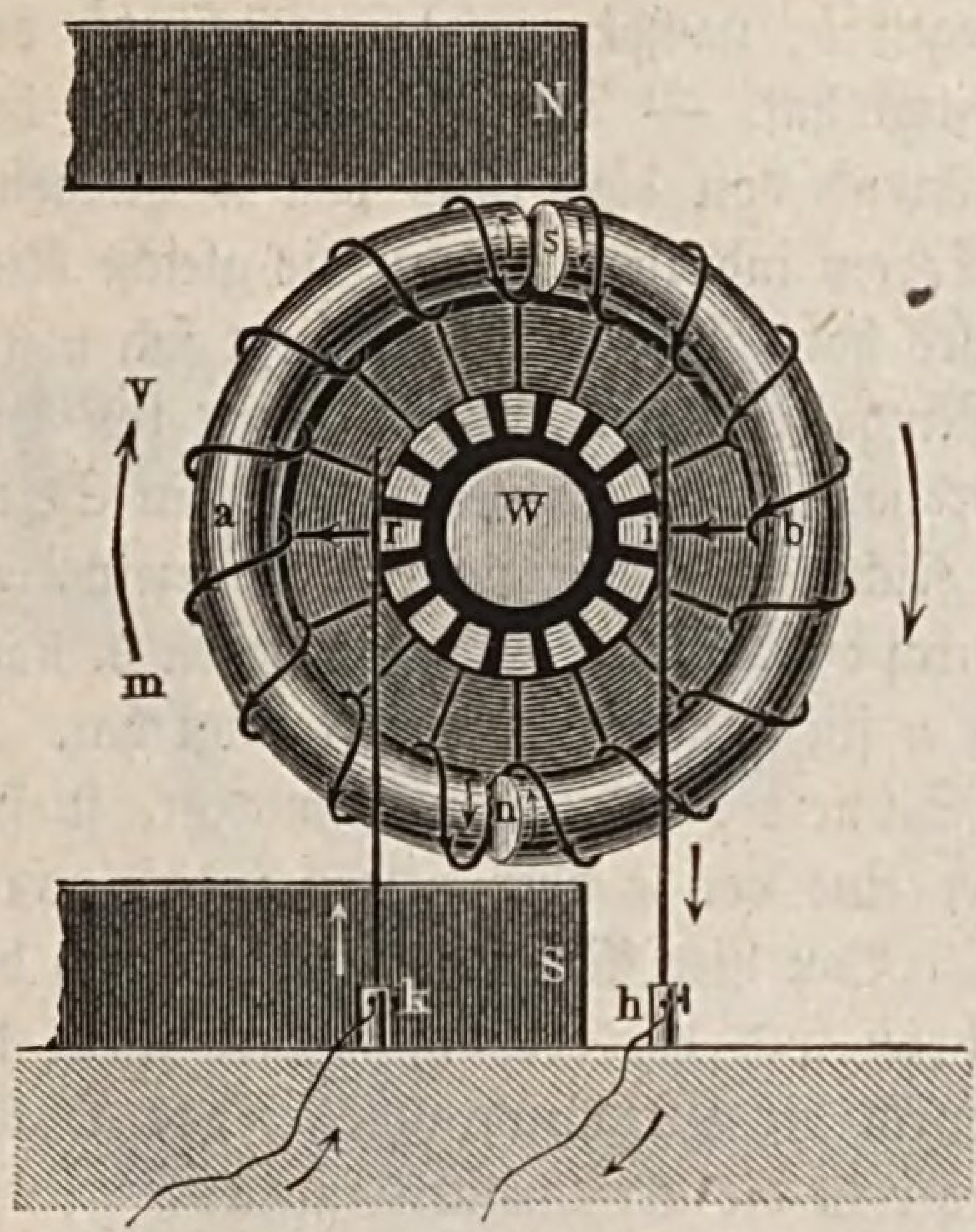
Die Unterbrechung des im Apparate selbst zurückkehrenden Stromes giebt sich auch durch einen kräftigen an der Unterbrechungsstelle auftretenden Funken zu erkennen.

In Fig. 498 sieht man zwischen den Spiralen und dem Kommutator eine hier nicht näher zu besprechende Vorrichtung, mittels deren man die Spiralen in verschiedener Weise (neben einander oder hinter einander) kombinieren kann.

2. Die Magnetinduktionsmaschine von Gramme. Der Hauptteil dieser Maschine, von welcher Fig. 502 eine schematische und Fig. 503 eine perspektivische Ansicht giebt, ist der Ringinduktor; derselbe hat folgende Einrichtung. Zwischen den Polen *NS* eines hufeisenförmigen Magnets befindet sich ein Ring *asbn* von aufgerolltem und gut ausgeglühtem Eisendraht, welcher um eine zu der Ebene der Schenkel des Magnets senkrechte Welle *W* in rasche Rotation versetzt werden kann. Auf diesen Ring, welcher allein nur der folgenden Erklärungen wegen bei *s* und *n* durchschnitten gezeichnet ist, sind eine große Anzahl (30 bis 300) Rollen von isoliertem Kupferdraht aufgewickelt, die mit ihren Enden zu einer im gleichen Drehungssinne fortlaufenden Spiralenreihe mit einander verlötet sind. Des leichteren Verständnisses wegen sind in Fig. 502 die Rollen nur als einzelne Windungen dargestellt. Von jeder Lötstelle gehen metallische Fortsätze, die man wegen ihrer radialen Richtung die Strahlstücke nennt, bis zu der mit isolierendem Hartgummi belegten Welle *W*, auf welcher sie um 90° umgebogen und gleichfalls durch Hartgummi von einander isoliert parallel neben einander befestigt sind. Auf der so belegten Welle schleifen zwei senkrecht zu den Schenkeln des Magnets gestellte Federn oder Drahtbündel *ih* und *rk*, welche zur Fortleitung des in dem Ringinduktor erzeugten Stromes dienen.

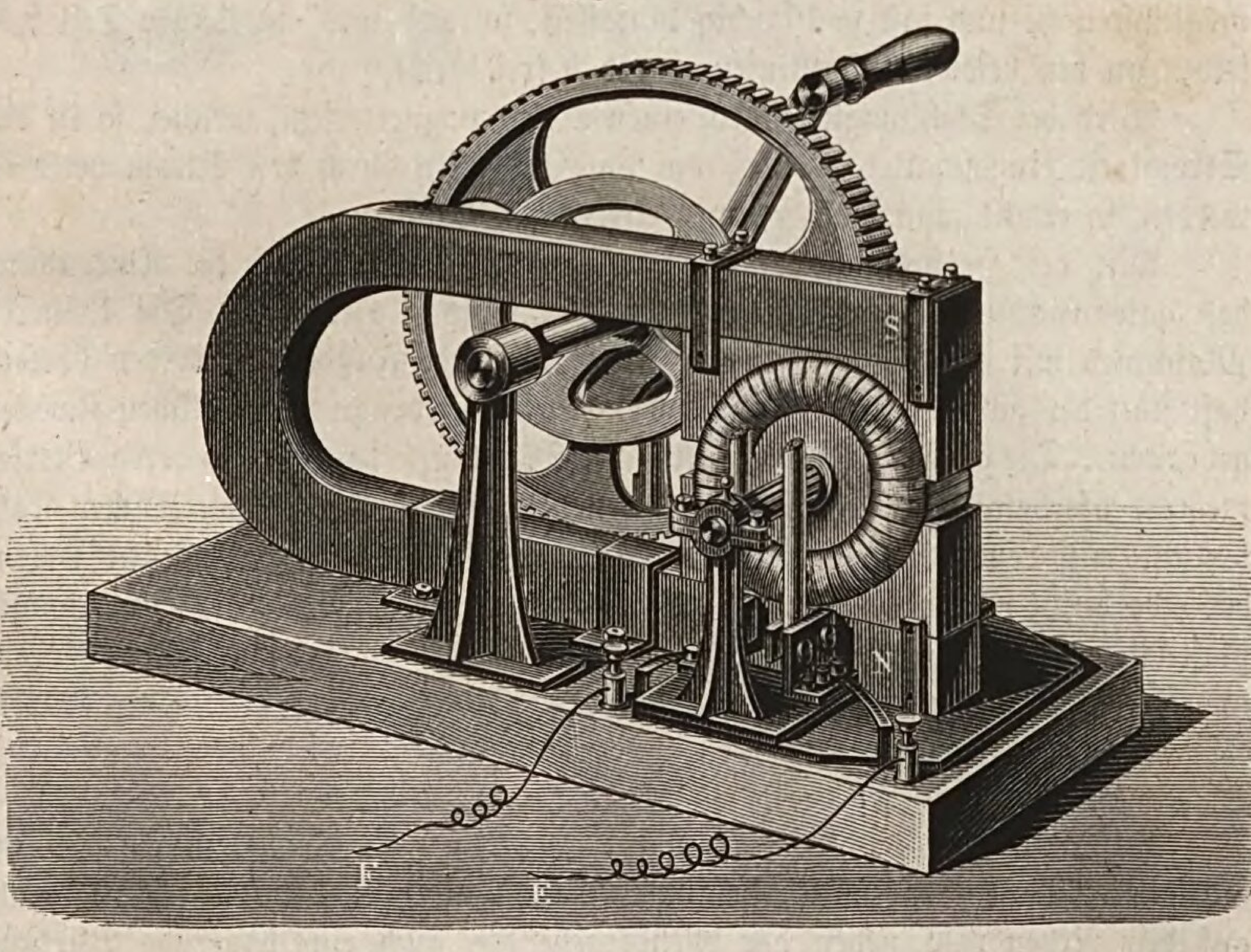
Die Wirkung dieser Maschine erklärt sich folgendermaßen. Zwischen den beiden Polen des Magnets *NS* wird der Eisenring magnetisch und zwar kann

Fig. 502.



man sich denselben aus zwei halbringförmigen Magneten zusammengesetzt denken, von denen jeder seinen Südpol bei *s*, den Nordpol aber bei *n* hat, und die nach der Ampèreschen Theorie von Strömen umkreist werden, deren Richtungen durch die links und rechts von *s* und *n* gezeichneten Pfeile angegeben sind. Wird nun der Ring umgedreht, so drehen sich wohl die Rollen und die Strahlstücke mit der Welle, dagegen bleiben die beiden Pole *s* und *n* an ihrem Orte. Angenommen die Drehung erfolge im Sinne des Pfeiles *mv*, so nähern sich die Drahtrollen auf dem Ringviertel *as* fortwährend dem Südpol auf der linken Seite von *s* und es wird daher in ihnen fortwährend ein Strom induziert, welcher die entgegengesetzte Richtung des links von *s* gezeichneten Pfeiles hat; dieser Strom bewegt sich somit durch die Drahtrollen von *a* gegen *s*. Die Drahtrollen auf dem

Fig. 503.



Ringviertel *ab* entfernen sich fortwährend von dem Südpol auf der rechten Seite von *s*; es wird daher in ihnen ein Strom induziert, welcher die gleiche Richtung des rechts von *s* gezeichneten Pfeiles hat; dieser Strom bewegt sich somit durch die Drahtrollen von *s* gegen *b*, nachdem er bei *s* sich mit dem von *a* nach *s* fließenden Strom vereinigt hat. — Die Drahtrollen auf dem Ringviertel *an* entfernen sich fortwährend von dem links von *n* gelegenen Nordpole; es wird daher in ihnen ein Strom induziert, welcher die gleiche Richtung des links von *n* gezeichneten Pfeiles hat; dieser Strom bewegt sich von *a* gegen *n*. Die Drahtrollen auf dem Ringviertel *nb* endlich nähern sich fortwährend dem rechts von *n* gelegenen Nordpole; es wird daher in ihnen ein Strom induziert, welcher die entgegengesetzte Richtung des rechts von *n* gezeichneten Pfeiles hat; dieser Strom bewegt sich durch die Drahtrollen von *n* gegen *b*, nachdem er bei *n* sich mit dem von *a* gegen *n* fließenden Strome vereinigt hat.

Während also der Ring sich im Sinne des Pfeiles *mv* umdreht, fließen zwei Ströme durch die Drahtrollen, der eine von *a* über *s*, der andere von *a* über *n* nach *b*, wo sie sich vereinigen. Von hier fließt der Strom durch das Strahlstück *bi* nach dem Drahtbündel *ih* und der Klemmschraube *h* in die äußere Leitung und kehrt aus dieser durch die Klemmschraube *k*, das Drahtbündel *kr* und das Strahlstück *ra* wieder in die Drahtrollen zurück.

Die Stromstärke einer solchen Maschine wächst mit der Geschwindigkeit der Umdrehung und dem Magnetismus des Ringes. Um letzteren besonders stark magnetisch zu machen, setzt man den induzierenden Magnet aus mehreren Lamellen zusammen und versieht ihn an seinen Polenden *S* und *N* mit Schuhen von weichem Eisen, welche halbkreisförmig ausgeschnitten sind und den Ring möglichst nahe und fast vollständig umfassen, so daß nur ein kleiner Teil desselben an den beiden Mittellinien *a* und *b* frei bleibt.

Wird der Stahlmagnet durch einen Elektromagnet ersetzt, welcher so in den Stromkreis eingeschaltet ist, daß die Pole desselben durch den Strom verstärkt werden, so erhält man eine dynamo-elektrische Maschine.

Mit der Herstellung der Gramme'schen Maschine ist die Anwendung des galvanischen Stromes in ein neues Stadium getreten. Die kleineren Maschinen mit Stahlmagneten und mit Hand- oder Fußbetrieb werden vorteilhaft statt der galvanischen Säulen in Vorlesungen oder zu medizinischen Zwecken gebraucht. Die großen dynamo-elektrischen Maschinen dagegen, zu deren Betrieb mehrere Pferdekräfte erforderlich sind, dienen zur Erzeugung des elektrischen Kohlenlichts auf Leuchttürmen, Schiffen, öffentlichen Plätzen und in großen Sälen; dasselbe besitzt eine Lichtstärke bis zu 30000 Normalkerzen. Auch zu galvanoplastischen Zwecken werden diese Maschinen verwendet und in solcher Größe angefertigt, daß ihr Strom stündlich bis zu 15 kg Silber oder 4 kg Kupfer oder Nickel niederschlägt.

250 **Diamagnetismus.** Nachdem Faraday die Erscheinungen der Induktionsströme entdeckt hatte, gelangte er zu der Ansicht, daß der Hauptdraht auf den Nebendraht neben der vorübergehenden auch eine dauernde Wirkung

ausüben müsse und daß der Schließungsschlag nur den Übergang des Drahtes in einen neuen hypothetischen Zustand, der Öffnungsschlag aber die Rückkehr aus demselben fühlbar mache. Diesen hypothetischen Zustand nannte er den elektrotonischen Zustand; ein solcher Zustand sollte nach seiner Ansicht in jedem Körper hervorgerufen werden, der sich in der Nähe einer durchströmten Spirale oder eines Magnets befindet. Nach vielen vergeblichen Versuchen gelang es ihm endlich, eine Reihe hierher gehöriger Erscheinungen aufzufinden.

Fig. 504.

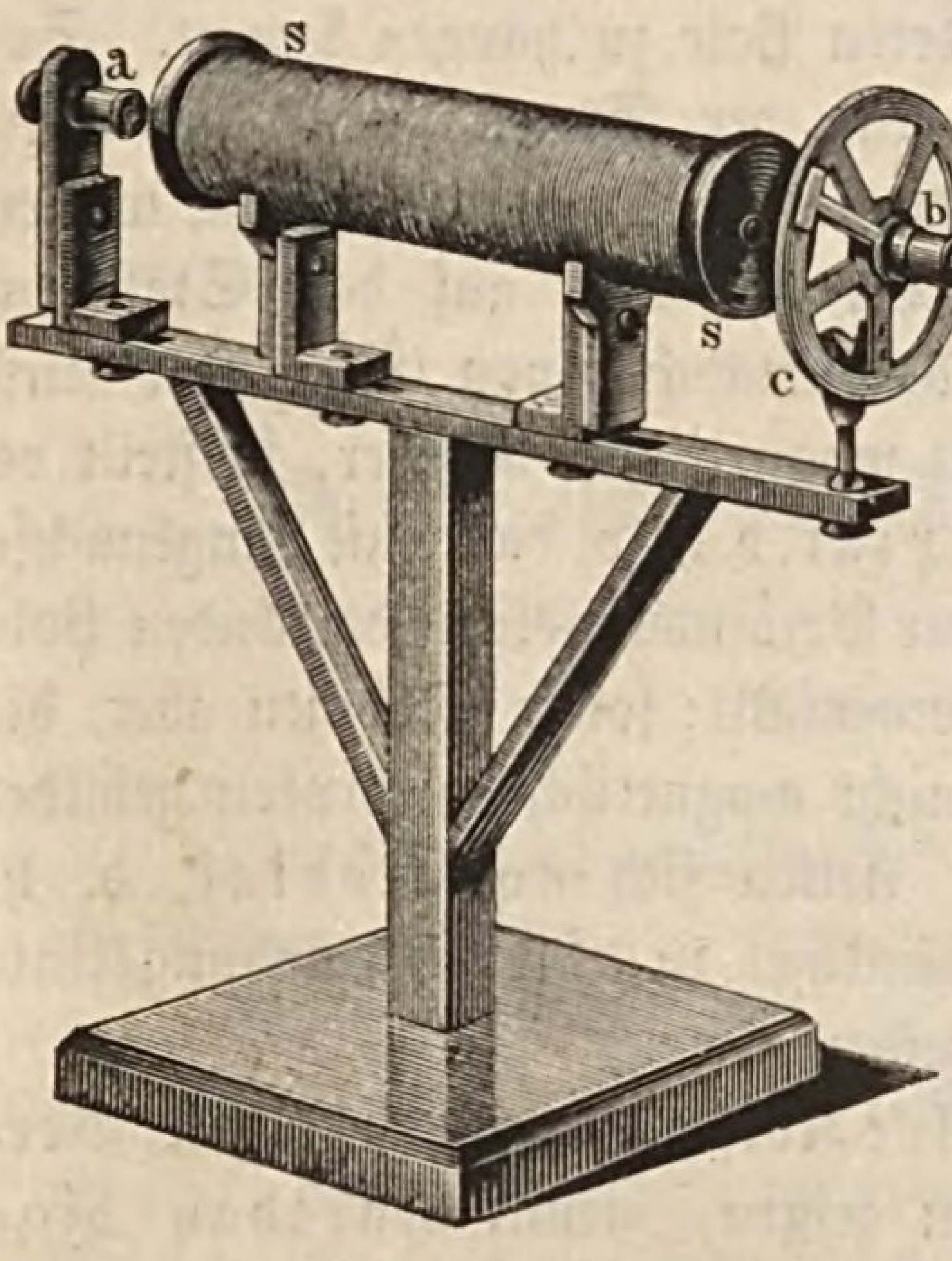
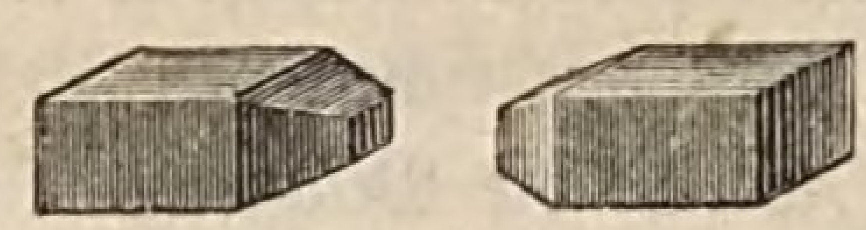


Fig. 505.



Führt man einen elektrischen Strom in vielfachen Windungen um eine durchsichtige Flüssigkeit herum, so wird derselben durch diesen Strom ein eigentümliches Verhalten gegen polarisierte Lichtstrahlen mitgeteilt. Fig. 504 stellt einen Apparat dar, mit welchem man die eben erwähnte Erscheinung beobachten kann; *a* und *b* sind zwei Nicol'sche Prismen, Kalkspathprismen, welche nur ein polarisiertes Bild geben, also die beiden Spiegel des Polarisations-Apparates vertreten. *S* ist eine Magnetisierungsspirale, in deren Höhlung eine an beiden Enden mit Glasplatten geschlossene Röhre steckt, welche mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt ist. Man sieht durch die beiden Nicol'schen Prismen und durch die mit der Flüssigkeit gefüllte Röhre nach der Flamme einer Argand'schen Lampe. Das Okularnikol *b* wird so gedreht, daß das Gesichtsfeld dunkel ist; läßt man nun einen kräftigen galvanischen Strom durch die Spirale gehen, so erscheint alsbald die Flamme wieder, und man muß das Okularnikol *b* nach der rechten oder linken Seite drehen, um sie wieder verschwinden zu machen.

Die Polarisationsebene des Strahles wird nach der Richtung gedreht, nach welcher der positive Strom in der Spirale cirkuliert.

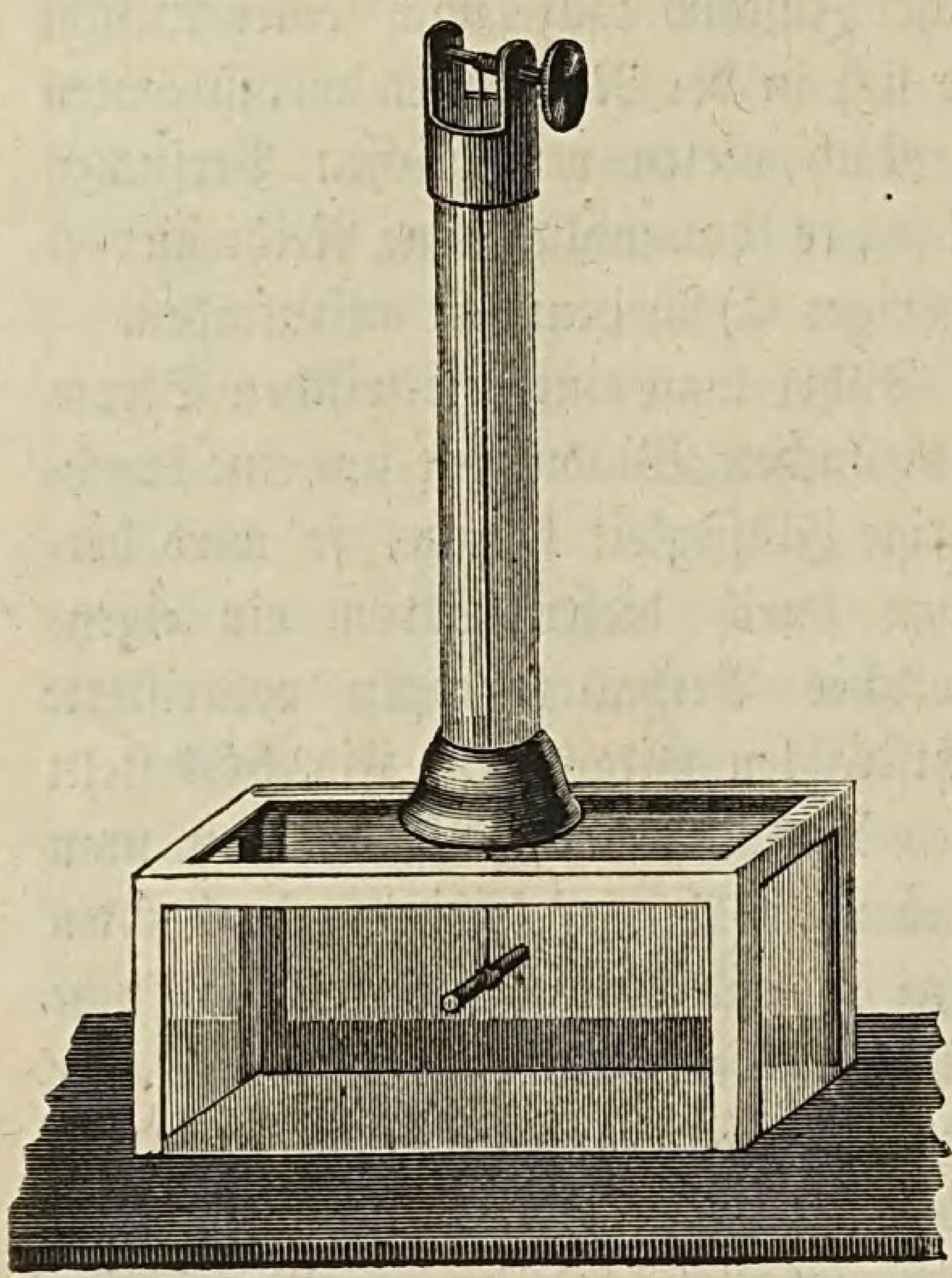
Man muß schon sehr starke Ströme anwenden und die Spirale muß viele Windungen haben, wenn man diese Erscheinung recht deutlich machen will.

Der galvanische Strom, oder ein Elektromagnet, bringt also auch auf nicht magnetische Körper eine dauernde Wirkung hervor, die zuerst auf optischem Wege nachgewiesen wurde; diese Einwirkung muß aber auch auf undurchsichtige Körper stattfinden und somit auch noch andere als optische Erscheinungen hervorbringen können.

Um die Wirkung zu zeigen, wird auf jedem Pole des Elektromagnets Fig. 462 ein weiches Eisen von der Form Fig. 505 aufgesetzt, so daß die

Spitzen derselben einander zugekehrt sind. Auf das Tischlein *t* setzt man den Glaskasten Fig. 506, welcher in der Mitte eine Glasröhre trägt. In dieser

Fig. 506.



Röhre hängt ein Kokonfaden herab, der ein Stäbchen des zu untersuchenden Körpers trägt. Man richtet den Faden so, daß das Stäbchen genau in die Mitte der beiden durch die Halbanker, Fig. 506, gebildeten Pole zu hängen kommt. Sobald nun der Strom durch die Windungen des Elektromagnets geht, wirken die Pole desselben auf das Stäbchen. Ist das Stäbchen von Eisen oder sonst einem magnetischen Körper, so stellt es sich axial, d. h. so, daß seine Längenachse mit der Verbindungslinie der beiden Pole zusammenfällt; solche Stäbchen aber, die aus nicht magnetischen Körpern gebildet sind, stellen sich äquatorial, d. h. rechtwinklig zu der Verbindungslinie der beiden Pole.

Alle Körper, welche das letztere Verhalten zeigen, nennt Faraday diamagnetische Körper. Sehr wenige magnetische Metalle ausgenommen, sind alle anderen Körper diamagnetische; besonders stark diamagnetisch ist Wismuth.

Die quere Stellung der diamagnetischen Körper zwischen den Polen des Elektromagnets ist die Folge einer Abstoßung, welche die Magnetpole auf sie äußern. Diese Abstoßung zeigt sich am besten auf folgende Weise: Man stelle die Halbanker Fig. 505 ganz nahe zusammen und hänge an den Faden Fig. 506 statt des Wismuthstäbchens nun ein Wismuthkügelchen, welches man so richtet, daß es gerade zwischen den beiden Polspitzen hängt. Sobald man die Kette schließt, wird das Kügelchen aus seiner Ruhelage getrieben und etwas auf die Seite gestoßen.

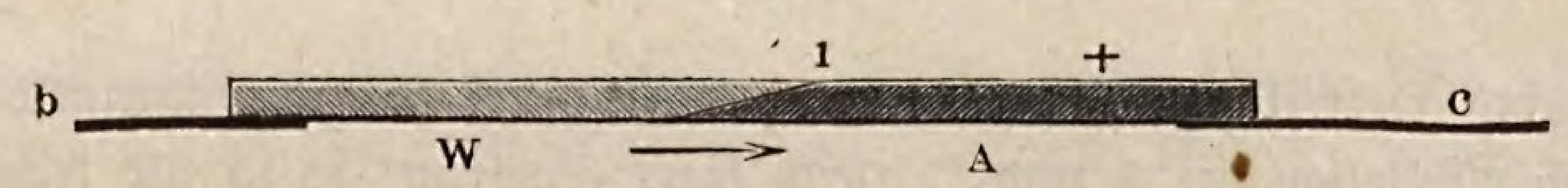
Fünftes Kapitel.

Thermo-elektrische Ströme und tierische Elektricität.

Thermo-elektrische Elemente. Wenn zwei oder mehrere Stücke verschiedener Metalle so zusammengelötet sind, daß sie einen geschlossenen Ring von beliebiger Form bilden, so entsteht ein mehr oder minder starker Strom, so oft eine der Lötstellen erwärmt wird, während alle übrigen kalt bleiben. Solche durch Temperaturunterschiede erzeugte Ströme wurden zuerst von Th. J. Seebeck im Jahre 1822 erkannt und von ihm als thermo-elektrische Ströme bezeichnet. 251

Je zwei zusammengelötete Stücke verschiedenartiger Metalle wie *W* und *A*, Fig. 507, bilden ein thermo-elektrisches Element. Um dasselbe bequem

Fig. 507.



in den Schließungsbogen eines Multiplikators einschalten zu können, ist an jedem Ende des Thermo-Elementes ein Kupferdraht, also an der einen Seite der Draht *b*, an der anderen der Draht *c* angelötet. — Ist nun *b* mit dem einen, *c* mit dem anderen Ende des Multiplikatordrahtes in Verbindung gebracht, so erfolgt ein Ausschlag der Multiplikatornadel, sobald die Lötstelle bei 1 etwa durch eine Weingeistflamme erwärmt wird.

Wenn *W* ein Wismuth-, *A* ein Antimonstäbchen ist, so zeigt die Richtung des Nadelausschlages an, daß der positive Strom an der erwärmten Stelle vom Wismuth zum Antimon geht, wie es der kleine Pfeil andeutet. Der positive Strom tritt also vom Antimon aus in den Multiplikator; das Antimon bildet also den positiven Pol des Thermo-Elementes.

Bildet man ein thermo-elektrisches Element aus irgend zwei Metallen, welche in der folgenden kleinen Tabelle verzeichnet sind, so geht an der erwärmten Lötstelle der positive Strom stets von dem in der Tabelle tiefer stehenden

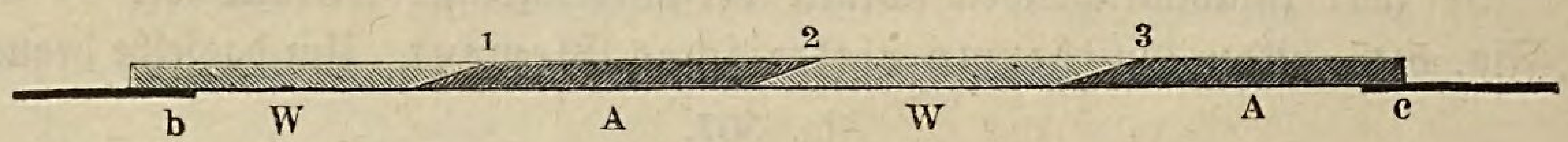
Metall zu dem höher stehenden, das höher stehende bildet also in dem angegebenen Sinn den positiven Pol des Elementes

+ Antimon-Zink	Kupfer
Antimon	Zinn
Eisen	Blei
Zink	Nickel
Platin	Neusilber
Kupfer	— Wismuth.

Die elektromotorische Kraft eines Thermo-Elementes ist bei gleicher Temperaturdifferenz der Lötstellen um so größer, je weiter die Metalle, aus denen es gebildet ist, in obiger gleichfalls von Seebeck aufgestellten Tabelle auseinanderstehen, die er thermo-elektrische Spannungsreihe nannte. Übrigens ist die elektromotorische Kraft der Thermo-Elemente sehr gering im Vergleich zu der hydro-elektrischer Elemente. Die elektromotorische Kraft eines Wismuth-Kupfer-Elementes von der in Fig. 507 dargestellten Konstruktion, dessen Lötstelle 1 um 100 Grad wärmer erhalten wird als die Stellen, an welchen die Drähte *b* und *c* angelötet sind, ist ungefähr nur $1/_{200}$ von der elektromotorischen Kraft eines Daniell'schen Bechers.

252 **Thermo-elektrische Säulen.** Nach dem Princip der Volta'schen Säule kann man auch mehrere thermo-elektrische Elemente zu einer thermo-elektrischen Säule verbinden. So stellt z. B. Fig. 508 die Verbindung

Fig. 508.



zweier thermo-elektrischer Elemente dar, welche bei 2 zusammengelötet sind. Würden die Lötstellen bei 1 und 2 gleich stark erwärmt, so könnte kein Strom entstehen, weil die durch die Erwärmung bei 2 erregte elektromotorische Kraft der bei 1 erregten gleich und entgegengesetzt ist. Werden aber die Lötstellen 1 und 3 erwärmt, während die übrigen kalt bleiben, so wird bei 3 ein Strom von gleicher Stärke und Richtung in Bewegung gesetzt, wie bei 1. Hat man also *n* thermo-elektrische Elemente zu einer Säule verbunden, so hat man nur die Lötstellen 1, 3, 5, 7 u. s. w. zu erwärmen, während 2, 4, 6, u. s. w. kalt bleiben, um eine elektromotorische Kraft zu erregen, welche *n* mal größer als die des einfachen Thermo-Elementes.

Thermo-elektrische Säulen wurden zuerst von Nobili (1830) konstruiert, um in Verbindung mit Multiplikatoren die geringsten Temperaturdifferenzen sichtbar zu machen. Fig. 509 stellt eine thermo-elektrische Säule dar. Sie ist aus 25 bis 30 Stäbchen von Wismuth und Antimon zusammengesetzt, welche ungefähr 3 bis 4 cm lang sind. Sie sind zusammengelötet, wie man Fig. 510 sieht, nämlich so, daß alle paarigen Lötstellen auf der einen, alle

unpaarigen auf der anderen Seite sich befinden. Die Zwischenräume zwischen den einzelnen Stäbchen sind mit einer isolierenden Substanz ausgefüllt und das ganze Bündel ist alsdann mit einer gemeinsamen Fassung umgeben, wie Fig. 509 zeigt. Das eine der beiden Halbelemente endlich, mit denen die Säule endigt, ist mit dem Stifte x, das andere mit dem Stifte y in Verbindung; diese Stifte bilden also die beiden Pole der Säule, und mit ihnen werden die Enden des Multiplikatordrahtes in Verbindung gebracht.

Fig. 509.

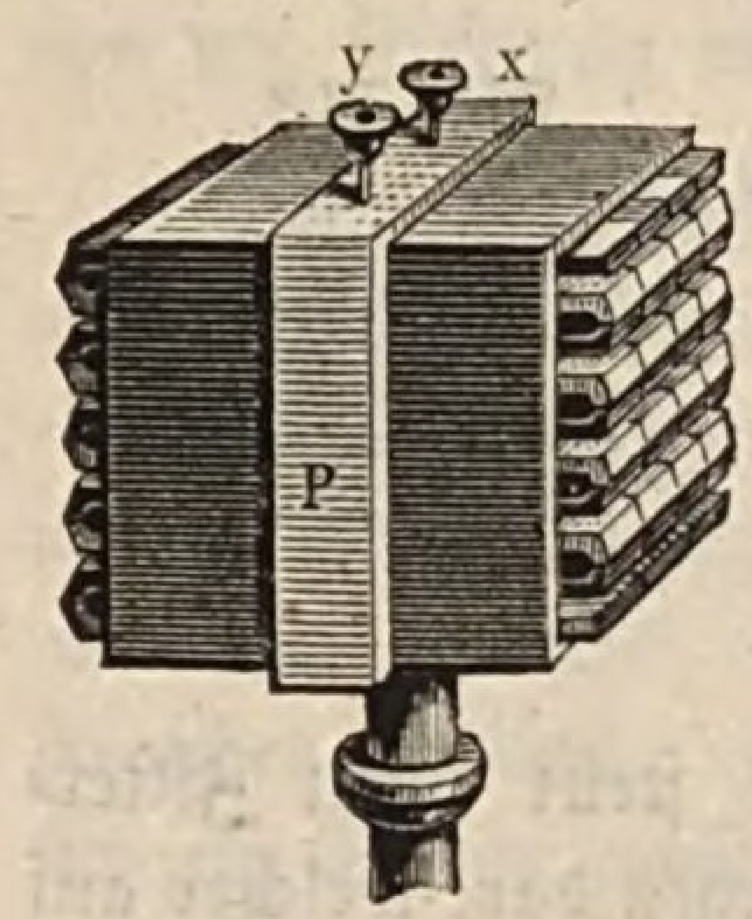
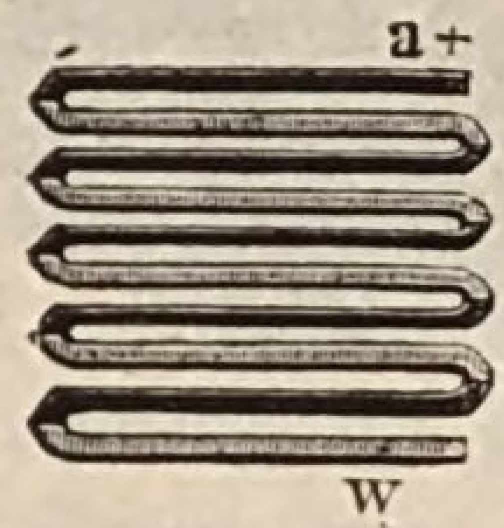


Fig. 510.



Wenn die Lötstellen auf der einen Seite nur die geringste Temperaturerhöhung erfahren, so wird die Multiplikatornadel sogleich aus dem magnetischen Meridian abgelenkt.

Auch größere Thermosäulen hat man hergestellt, unter denen namentlich die von Noë konstruierte Sternsäule eine sehr zweckmäßige Einrichtung hat. Die einzelnen Thermo-Elemente bestehen aus Stäbchen einer Legierung von Antimon und Zink und aus Drähten von Neusilber und sind in radialer Richtung zur Säule zusammengesetzt, so daß die zu erwärmenden Lötstellen auf der Peripherie eines kleinen, die kalt zu haltenden dagegen auf der eines größeren Kreises liegen. Durch diese Anordnung ist es möglich die erstgenannten Lötstellen mit einer einzigen Lampe zu erhitzen.

Mit mehreren solcher Thermosäulen, deren jede aus 20 Elementen besteht, lassen sich bei stärkeren Temperaturdifferenzen der beiden Seiten ziemlich starke thermoelektrische Ströme erzeugen, welche alle Effekte hydroelektrischer Ströme, wenn auch im schwachen Grade, hervorzubringen im Stande sind.

Tierische Elektricität. Es ist schon lange bekannt, daß es 253
Fische giebt, welche elektrische Schläge hervorbringen können; unter diesen sind der Zitterrochen und der Zitteraal die ausgezeichnetsten. Der Zitterrochen kommt im Mittelländischen Meere und im Atlantischen Oceane, der Zitteraal aber in den Landseeen Südamerikas vor.

Nimmt man den Zitterrochen aus dem Wasser, so erhält man einen Schlag, wenn man den Fisch an Bauch und Rücken anfaßt.

Befindet sich der Fisch im Wasser, so ist eine unmittelbare Berührung desselben zur Erteilung eines Schlages nicht nötig.

Das Erteilen eines elektrischen Schlages liegt ganz in der Willkür des Tieres.

Der Rücken des Zitterrochen ist positiv, der Bauch negativ elektrisch. Der elektrische Strom, welcher durch einen Leitungsdraht geht, der den Rücken mit dem Bauche verbindet, bringt alle Wirkungen anderer elektrischer Ströme, wenn auch zum Teil in schwachem Maße, hervor.

Das Organ, in welchem sich die Elektricität entwickelt, hat bei den ver-

schiedenen elektrischen Fischen im wesentlichen dieselbe Textur und dasselbe Ansehen, obgleich dessen Gestalt, Größe und Lage verschieden sind.

Fig. 511.

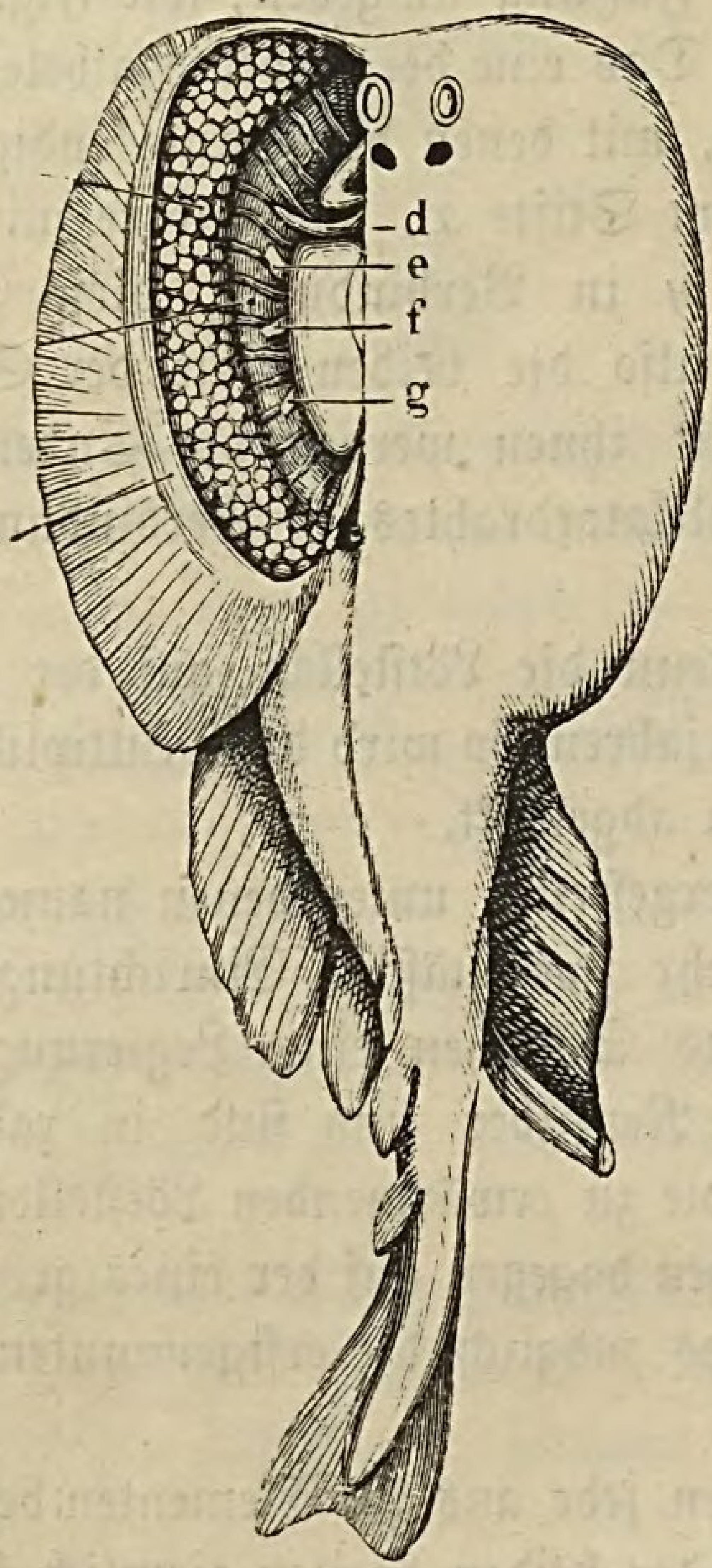


Fig. 512.

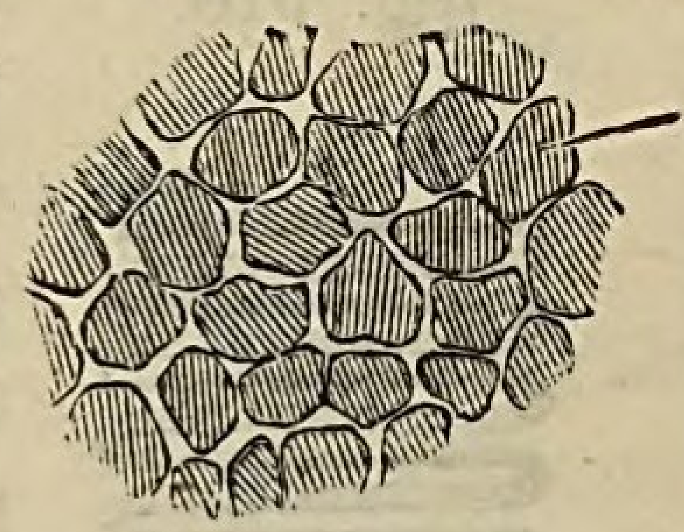
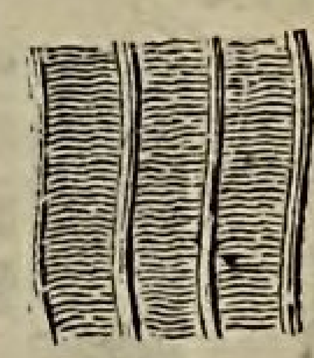


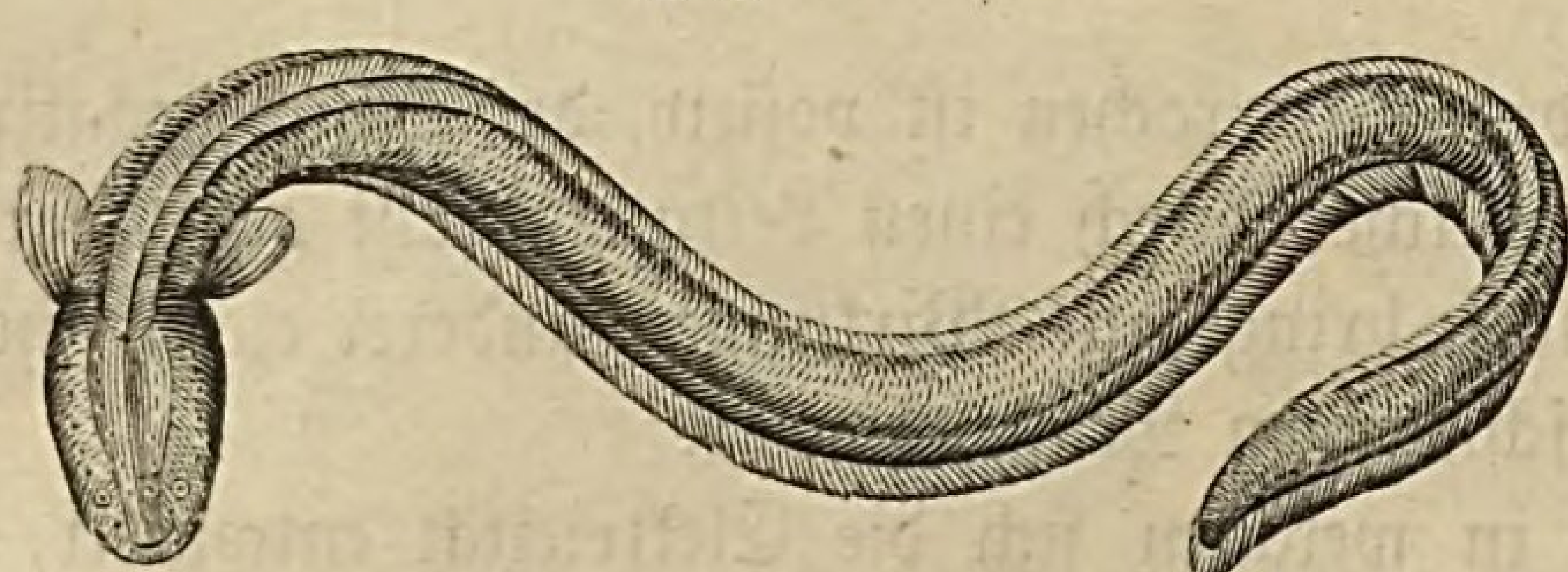
Fig. 513.



Die Fig. 511 stellt einen Zitterrochen von oben gesehen dar, welcher auf der einen Seite geöffnet ist, so daß man das elektrische Organ sieht. Es geht vorn bis dicht an den Vorderrand des Kopfes; seine obere Fläche stößt mittels einer faserigen Haut an die Haut des Rückens, seine untere an die des Bauches; seine äußere Fläche ruht an dem Knorpel der Seitenflosse, seine innere an der Muskulatur des Kopfes und des vorderen Teiles des Rumpfes. Von oben oder unten gesehen zeigt das elektrische Organ polygonale oder rundliche Abteilungen, Fig. 512; von der Seite aber sieht man parallele Streifen, wie Fig. 513 zeigt. Das ganze Organ besteht aus einer Menge polygonaler oder rundlicher Säulchen, deren Achse die Richtung vom Bauche zum Rücken hat. Die Randbegrenzung jedes Säulchens bildet eine etwas dichtere, sehnichte Membran, welche, wie es scheint, isolierend wirkt. Jedes Säulchen besteht, ähnlich der Volta'schen Säule, aus vielen auf einander geschichteten feinen Blättchen, welche durch eine schleimige Flüssigkeit von einander getrennt gehalten werden.

Bei dem Zitteraale, Fig. 514, liegt das elektrische Organ in dem sehr langen Schwanze, welcher fast $4^1/_2$ mal so lang ist als Kopf und Rumpf zusammengenommen; das elektrische Organ liegt fast der ganzen Länge des Schwanzes nach auf jeder Seite und unterhalb der Wirbelsäule, so daß es eine

Fig. 514.



bedeutende Länge hat, woher es denn auch kommt, daß der Zitteraal so außerordentlich starke Schläge erteilen kann. Bei diesem Fische ist also die Achse der elektrischen Säule dem Schwanze parallel, weshalb bei ihm auch der Strom von der Richtung vom Kopfe nach dem Schwanze geht.

Schließlich darf nicht unerwähnt bleiben, daß im tierischen Organismus auch elektrische Ströme nachgewiesen worden sind, welche nicht durch besondere elektrische Organe hervorgebracht werden. Nobili hat gefunden, daß, wenn man mit dem einen Drahtende eines empfindlichen Multiplikators den Kopf, mit dem anderen Drahtende die Füße eines lebenden oder frisch getöteten Frosches berührt, ein Strom vom Kopfe nach den Füßen geht; ebenso läßt sich ein Strom nachweisen, wenn man in den Muskel irgend eines Tieres einschneidet und den äußeren Muskel mit der Schnittfläche durch den Multiplikatordraht verbindet.

Du Bois-Reymond hat die Gesetze des Muskelstromes näher untersucht und auch ähnliche Stromwirkungen an den Nerven nachgewiesen.

Fünftes Buch.

Von der Wärme.

Erstes Kapitel.

Ausdehnung.

Wirkungen der Wärme. Unser Gefühlsvermögen unterscheidet 254
verschiedene Zustände der Körper, die wir mit heiß, warm, kalt u. s. w. bezeichnen. Wenn ein Körper, den wir kalt nennen, warm oder heiß wird, so nimmt er auch an Volumen zu; er dehnt sich aus.

Die vorerst noch unbekannte Ursache, welche diese Ausdehnung der Körper bewirkt und welche zugleich die verschiedenen eben erwähnten Empfindungen unseres Gefühlsvermögens veranlaßt, nennt man Wärme. An dem Wärmezustand eines Körpers unterscheidet man 1. den Grad seiner Erwärmung oder seine Temperatur und 2. die Wärmemenge, welche in ihm vorhanden ist.

Die Wärme bewirkt nicht allein eine Ausdehnung der Körper, sondern sie ist auch im Stande, die Aggregatzustände der Körper zu verändern: sie bewirkt die Schmelzung fester und die Verdampfung flüssiger Körper. Wir wollen nun im folgenden die Gesetze dieser Erscheinungen näher betrachten.

Das Thermometer. Da alle Körper durch Wärme ausgedehnt 255
werden, und da das Volumen eines Körpers von dem Grade seiner Erwärmung abhängt, so kann die Ausdehnung eines Körpers dazu dienen, um seine Temperatur zu messen. Die Instrumente, welche man anwendet, um die Temperatur zu bestimmen, nennt man Thermometer.

Fig. 515 (a. f. S.) stellt ein Quecksilber-Thermometer dar. An dem unteren Ende einer engen Glasröhre befindet sich ein kugelförmiges oder cylindrisches Gefäß; dies Gefäß und ein Teil der Röhre sind mit Quecksilber gefüllt. Durch Erwärmung vermehrt sich das Volumen des Quecksilbers und es steigt in der Röhre; man sagt dann, die Temperatur sei erhöht worden. Wenn die Kugel erkaltet, so vermindert sich das Volumen des Quecksilbers wieder und es sinkt in der Röhre; man sagt dann, die Temperatur sei gefallen.

Bei gleicher Temperatur nimmt der Gipfel der Quecksilbersäule auch stets dieselbe Stelle in der Röhre ein. Wenn man ein anderes, größeres oder kleineres

Thermometer mit dem ersteren vergleicht, so werden beide mit einander steigen und fallen, aber die absolute Größe des Steigens und des Fallens kann doch sehr verschieden sein. Wenn z. B. die beiden Gefäße gleich sind, aber die eine Röhre einen zehnmal größeren Querschnitt als die andere hat, so würde bei gleicher Temperaturerhöhung das Quecksilber in der engen Röhre zehnmal so hoch steigen als in der anderen.

Um ein Thermometer anzufertigen, wird an eine enge, ihrer ganzen Länge nach gleich weite Glasröhre ein Gefäß *t*, Fig. 516, angeblasen und oben ein weiteres in ein offenes Röhrchen endigendes Gefäß *h* angeschmolzen. Um den ganzen Apparat mit Quecksilber zu füllen, werden zunächst *h* und *t* über der Weingeistlampe erwärmt und dadurch die Luft, welche sie enthalten, ausgedehnt.

Fig. 516.

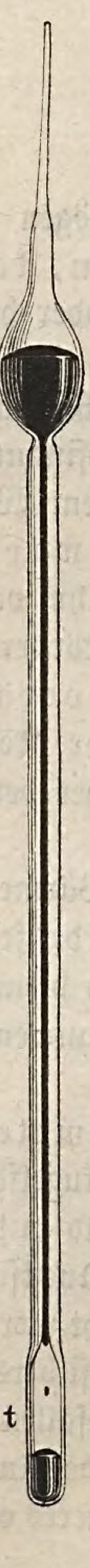
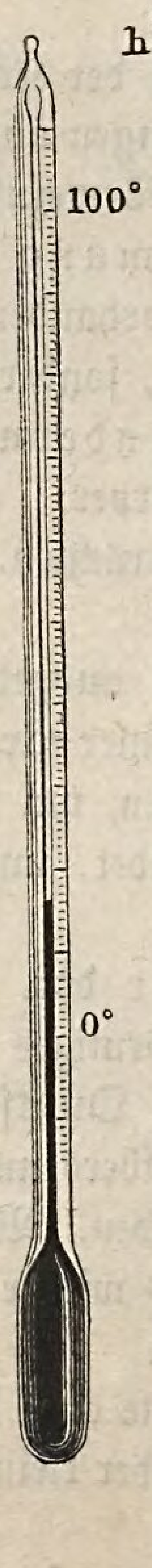


Fig. 515.



Kehrt man nun die ganze Vorrichtung um und taucht man dann die Spitze von *h* in ein Gefäß mit Quecksilber, so wird beim Erkalten von *h* und *t* die in ihnen enthaltene Luft sich zusammenziehen und das Gefäß *h* wird sich zum Teil mit Quecksilber füllen. — Nun wird der Apparat wieder in aufrechte Stellung gebracht und *t* abermals erwärmt, um die in ihm noch enthaltene Luft teilweise auszutreiben, welche in Form von Bläschen durch das Quecksilber in *h* entweicht. Beim Erkalten füllt sich dann ein Teil des Gefäßes *t* mit Quecksilber, welches aus *h* herabsteigt, um den Raum der ausgetriebenen Luft einzunehmen. Bei abermaliger Erwärmung des Gefäßes *t* wird von neuem ein Teil der eingeschlossenen Luft ausgetrieben, die Erwärmung wird aber jetzt so weit fortgesetzt, bis das Quecksilber in *t* ins Kochen kommt, und nun nehmen die mit Heftigkeit entweichenden Dämpfe des Quecksilbers die noch übrige Luft vollständig mit fort. Beim Erkalten verdichten sich die Dämpfe in *t*, und aus *h* sinkt das Quecksilber in die Röhre und das Gefäß *t* herab, bis diese vollständig gefüllt sind.

Ist auf diese Weise das Gefäß *t* samt der Röhre mit Quecksilber gefüllt und der Apparat vollständig erkaltet, so wird das überflüssige Quecksilber aus *h* entfernt und dann die Röhre dicht unter diesem Gefäße vor der Glasbläserlampe zu einer feinen Spitze ausgezogen.

Alsdann wird die Quecksilbermenge im Thermometer r e g u l i e r t, d. h. man setzt das Gefäß des Thermometers einer Temperatur aus, welche etwas höher ist als die höchste Grenze, für welche das Instrument gebraucht werden soll. Will man z. B. ein Thermometer herstellen, welches bis zum Siedepunkt des Wassers geht, so steckt man es in eine siedende gesättigte Lösung von

Kochsalz. Infolge der steigenden Wärme tritt das Quecksilber tropfenweise aus der feinen Spitze der feinen Röhre aus. Ist das Austreten von Quecksilbertröpfchen beendigt und hat die ganze Quecksilbermasse im Gefäß die Temperatur der umgebenden siedenden Flüssigkeit erlangt, so wird das Rohr durch Zuschmelzen der feinen Spitze geschlossen.

Um das Thermometer zu vollenden, muß es noch *graduiert* werden, was dadurch geschieht, daß man *zwei unveränderliche Punkte* auf der Röhre bestimmt und den Zwischenraum, den sogenannten *Fundamental-Abstand*, in gleiche Teile teilt. Für die festen Punkte nimmt man in der Regel den *Gefrierpunkt* und den *Siedepunkt* des *Wassers*. Um den Gefrierpunkt zu bestimmen, steckt man die Thermometerkugel und die Röhre, soweit das Quecksilber in derselben reicht, in ein Gefäß mit fein zerstoßenem Eise oder Schnee, Fig. 517. Wenn die Temperatur der umgebenden Luft nur wenig höher ist als der Gefrierpunkt, so schmilzt das Eis, und die ganze Masse nimmt die unveränderliche Temperatur des Gefrierpunktes an. Bald erlangt auch das Thermometer diese Temperatur und bleibt von dem Augenblicke an vollkommen stationär. Man merkt sich jetzt den Punkt der Röhre, wo gerade der Gipfel der Quecksilbersäule steht, und bezeichnet ihn entweder mit Tusche oder mit einem Diamanten.

Fig. 517.

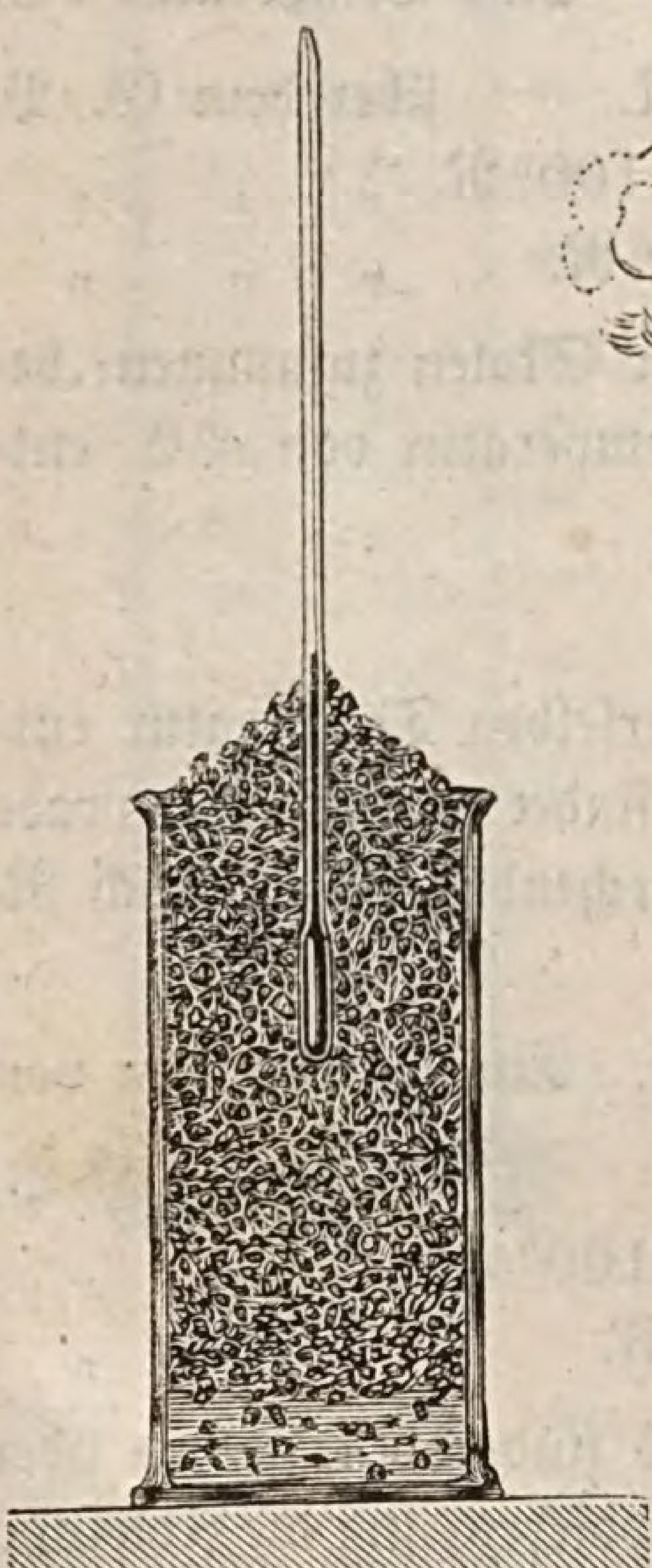
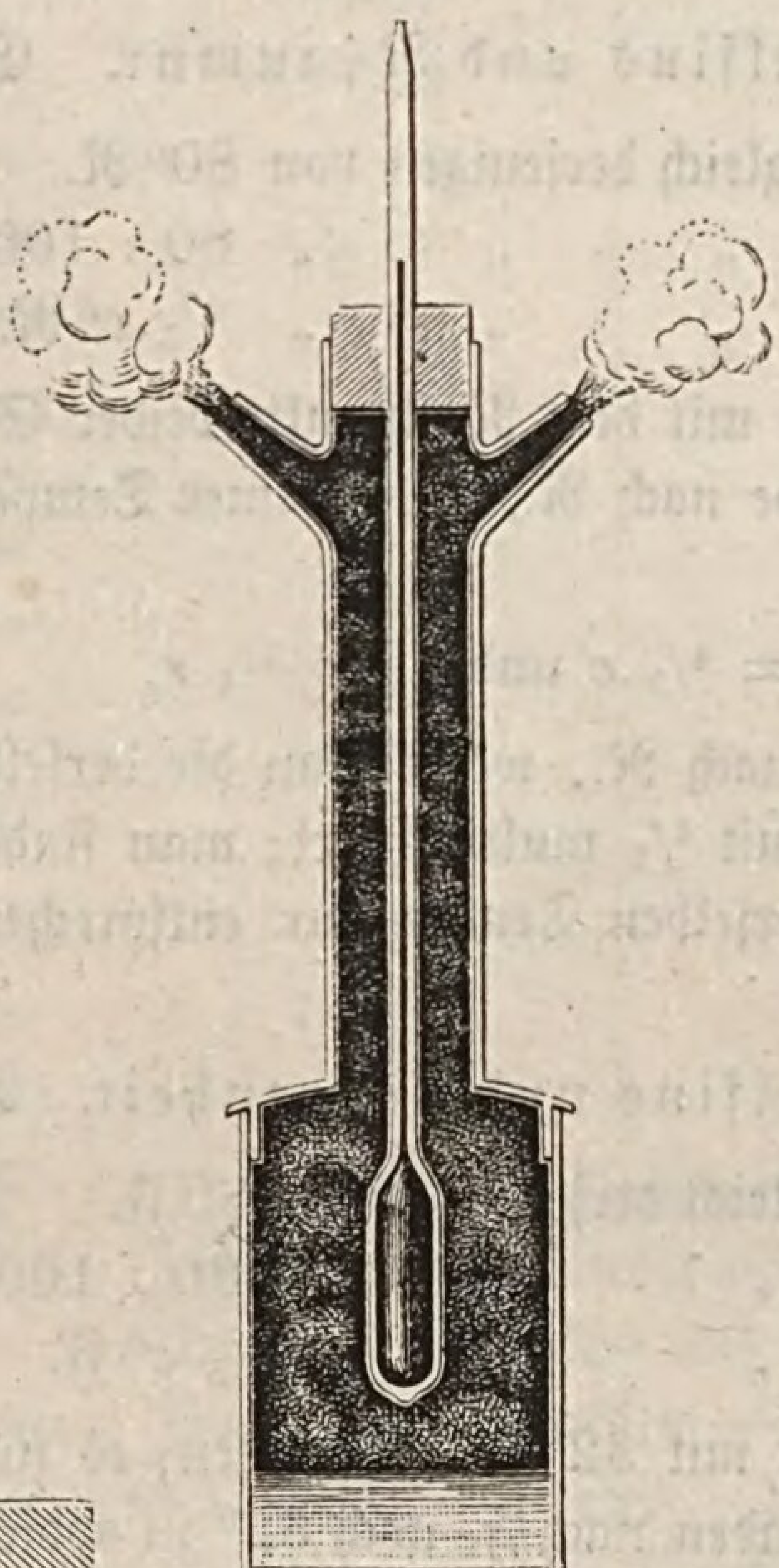


Fig. 518.



Um den *Siedepunkt* zu bestimmen, bringt man das Thermometer in ein Metallgefäß mit langem Halse, Fig. 518, in welchem man destilliertes Wasser zum Kochen bringt; nachdem es einige Zeit gekocht hat, sind alle Teile des Gefäßes gleichmäßig erwärmt, und der Dampf entweicht durch die Seitenöffnungen; das Thermometer ist alsdann allenthalben von Dampf umgeben, dessen Temperatur dieselbe ist wie die der obersten Wasserschicht. Das Quecksilber steigt bald bis zu einem Punkte, auf dem es fest stehen bleibt. Man bezeichnet diesen Punkt wie den Gefrierpunkt.

Hat man so den Fundamental-Abstand bestimmt, so wird derselbe eingeteilt, und zwar in 100 Teile beim *hundertteiligen* Thermometer, in 80 Teile

beim Thermometer nach Réaumur und in 180 Teile bei dem nach Fahrenheit.

Beim hundertteiligen Thermometer, dessen Skala von dem Stockholmer Akademiker Strömer (1750) herrührt, gewöhnlich aber Celsius zugeschrieben wird, bezeichnet man den Gefrierpunkt mit Null, den Siedepunkt mit 100. Diese Skala findet immer weitere Verbreitung; wir werden uns in diesem Buche derselben ausschließlich bedienen.

Beim achtzigteiligen Thermometer nach Réaumur (1730), welches noch häufig in Deutschland und Frankreich gebraucht wird, ist der Gefrierpunkt ebenfalls mit Null, der Siedepunkt aber mit 80 bezeichnet.

Beim 180teiligen Thermometer, welches Fahrenheit in Danzig um 1714 konstruierte und dessen man sich vorzugsweise in England und Amerika bedient, ist der Gefrierpunkt mit 32 und der Siedepunkt mit 212 bezeichnet.

Nach diesen Angaben ist es nun leicht, die Ablesungen der einen Skala in die der anderen zu verwandeln:

1. Skalen nach Celsius und Réaumur. Eine Temperatur von

100° C.	über dem G.-P. ist gleich derjenigen von	80° R.	über dem G.-P.
1° C.	„ „ „ „ „ „ „	80 : 100° R.	„ „ „
c° C.	„ „ „ „ „ „ „	$^4/_5\, c$° R.	„ „ „

Der Eispunkt fällt aber hier mit dem Nullpunkte beider Skalen zusammen; bezeichnet man daher die Grade nach R., welche einer Temperatur von c° C. entsprechen, mit r, so ist

$$r = {}^4/_5\, c \text{ und } c = {}^5/_4\, r,$$

d. h. man findet die Grade nach R., wenn man die derselben Temperatur entsprechenden Grade nach C. mit $^4/_5$ multipliziert; man findet dagegen die Grade nach C., wenn man die derselben Temperatur entsprechenden Grade nach R. mit $^5/_4$ multipliziert.

2. Skalen nach Celsius und Fahrenheit. Eine Temperatur von

100° C.	über dem G.-P. ist gleich derjenigen von	180 F.	über dem G.-P.
1° C.	„ „ „ „ „ „ „	180 : 100° F.	„ „ „
c° C.	„ „ „ „ „ „ „	$^9/_5\, c$° F.	„ „ „

Hier fällt aber der Eispunkt mit 32° F. zusammen; es sind somit zu den über dem Eispunkte gezählten Graden nach F. noch 32° zu addieren, um die Ablesung nach der Skala von F. zu erhalten. Bezeichnet man daher die Grade nach F., welche einer Temperatur von c° C. entsprechen, mit f, so ist:

$$f = 32 + {}^9/_5\, c \text{ und } c = {}^5/_9\, (f - 32),$$

d. h. man findet die Grade nach F., wenn man die derselben Temperatur entsprechenden Grade nach C. mit $^9/_5$ multipliziert und zu dem Produkte 32 addiert; man findet dagegen die Grade nach C., wenn man die derselben Temperatur entsprechenden Grade nach F. um 32 vermindert, und die Differenz mit $^5/_9$ multipliziert.

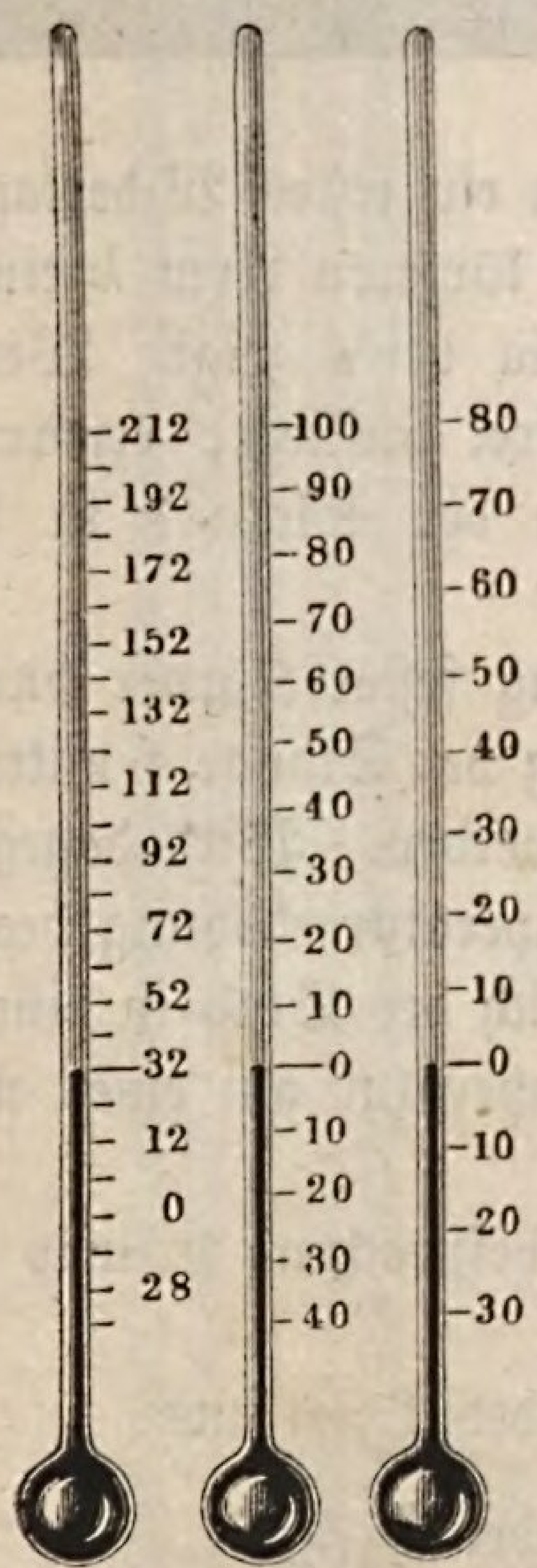
3. Skalen nach Réaumur und Fahrenheit. Durch ähnliche Schlußfolgerung wie unter 2. findet man:

$$f = 32 + {}^{9}/_{4}\, r \text{ und } r = {}^{4}/_{9}\,(f - 32),$$

d. h. man findet die Grade nach F., wenn man die derselben Temperatur entsprechenden Grade nach R. mit $^{9}/_{4}$ multipliziert und zu dem Produkte 32 addiert; man findet dagegen die Grade nach R., wenn man die derselben Temperatur entsprechenden Grade nach F. um 32 vermindert und die Differenz mit $^{4}/_{9}$ multipliziert.

Zur leichteren Vergleichung der drei verschiedenen Skalen mag folgende Zusammenstellung dienen. Fig. 519 giebt eine Übersicht derselben.

Fig. 519.



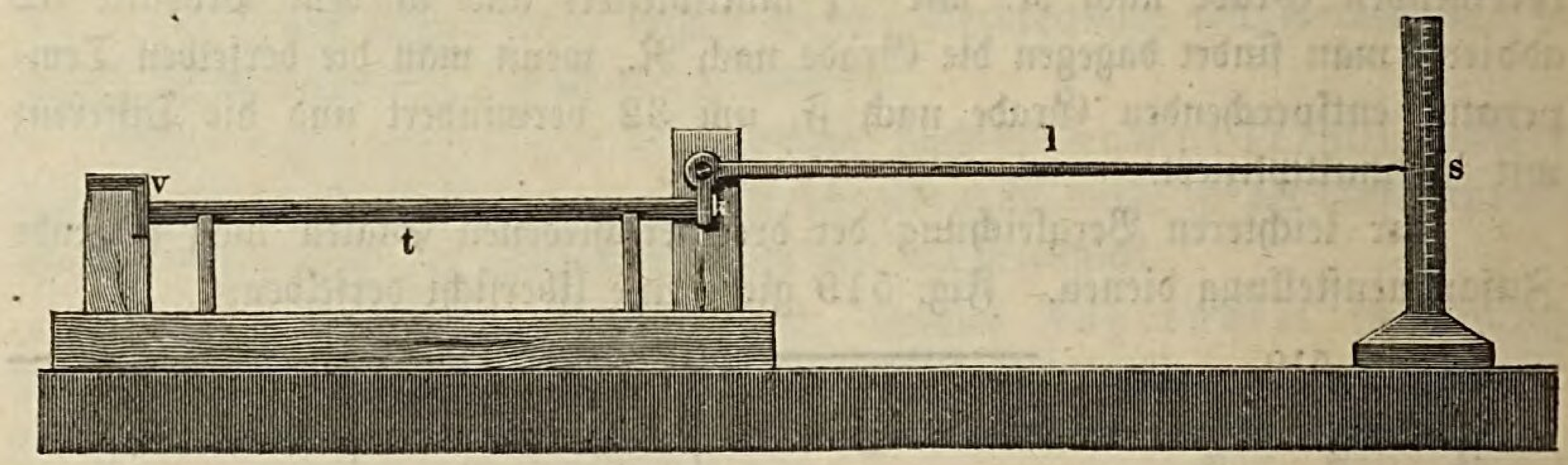
Celsius.	Réaumur.	Fahrenheit.
− 20	− 16	− 4
− 10	− 8	+ 14
0	0	32
+ 10	+ 8	50
20	16	68
30	24	86
40	32	104
50	40	122
60	48	140
70	56	158
80	64	176
90	72	194
100	80	212

Um auch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt und über dem Siedepunkt messen zu können, wird die Skala nach unten und nach oben fortgesetzt. Man kann jedoch nicht weiter hinab als bis gegen — 35° C. die Einteilung fortsetzen, weil bei — 40° das Quecksilber gefriert. Dagegen läßt sich aufwärts die Skala bis 350° C., dem Siedepunkt des Quecksilbers fortsetzen. — Außer dem Quecksilber hat man auch gefärbten Weingeist zur Füllung von Thermometern benutzt, welche namentlich zur Messung sehr niedriger Temperaturen geeignet sind. Das Wasser kann nicht als thermometrische Flüssigkeit benutzt werden, weil sein Gefrierpunkt zu hoch und weil, wie wir in §. 258 sehen werden, seine Ausdehnung höchst ungleichmäßig ist.

Lineare Ausdehnung fester Körper. Unter linearer Aus- 256
dehnung versteht man die Verlängerung, welche ein fester Körper infolge von

Temperaturerhöhung nach irgend einer Richtung hin erfährt. Diese Verlängerung ist stets eine sehr kleine Größe; man mußte deshalb auf besondere Mittel sinnen, um sie dem Auge sichtbar zu machen. Dies geschieht z. B. beim Hebelpyrometer, Fig. 520. Die Stange t, deren Ausdehnung man

Fig. 520.



beobachten will, steht mit ihrem einen Ende bei v gegen ein festes Widerlager an; das andere Ende des Stabes aber stößt gegen den kürzeren Arm k eines Winkelhebels an, dessen längerer Arm l auf eine Skala bei s zeigt. Wenn die Stange t, welche auf zwei wagerechten Stützen frei aufliegt, erwärmt wird, so sieht man das Ende des langen Hebels l an der Skala s in die Höhe gehen.

Wenn es sich nur darum handelt, die Ausdehnung fester Körper durch die Wärme sichtbar zu machen, so kann die Erwärmung der Stange t mittels untergesetzter Gas- oder Weingeistlampen bewerkstelligt werden. Wird dagegen die Messung der Ausdehnung für eine bestimmte Temperaturerhöhung beabsichtigt, so muß der Apparat so eingerichtet sein, daß sich der Stab in einem mit Wasser oder Öl gefüllten Troge befindet, dessen Temperatur auf einen mit dem Thermometer zu bestimmenden Grad erhöht wird.

Mit Apparaten, welchen im wesentlichen das eben besprochene Princip zu Grunde liegt, hat man folgende Resultate ermittelt.

Für eine Temperaturerhöhung von 0 bis 100° C. dehnt sich aus:

Platin	um	0,00086	oder	$^1/_{1167}$
Glas	„	0,00087	„	$^1/_{1147}$
Stahl, gehärtet	„	0,00126	„	$^1/_{807}$
Eisen	„	0,00122	„	$^1/_{819}$
Kupfer	„	0,00171	„	$^1/_{584}$
Messing	„	0,00188	„	$^1/_{531}$
Blei	„	0,00285	„	$^1/_{351}$
Zink	„	0,00294	„	$^1/_{340}$

seiner Länge. Ein Stahlstab also, welcher bei 0° eine Länge von 807 mm hat, wird bei 100° eine Länge von 808 mm haben; ein Zinkstab von nur 340 mm Länge wird sich aber bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 100° ebenfalls schon um 1 mm ausdehnen. Unter allen oben angeführten Körpern dehnt sich Platin am wenigsten, Zink am stärksten aus.

Zwischen 0 und 100° dehnen sich fast alle festen Körper gleichmäßig aus, d. h. ihre Ausdehnung ist der Temperaturerhöhung proportional. Bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 10° dehnt sich also das Kupfer um 0,000171, bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 1° dehnt es sich um 0,0000171 seiner Länge aus.

Fig. 521.



Die Zahl, welche ausdrückt, um den wievielsten Teil seiner Länge bei 0° sich ein fester Körper bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 1° ausdehnt, heißt der Koëfficient der Längenausdehnung. Man hat nur die in der obigen Tabelle enthaltenen Zahlen durch 100 zu dividieren, um den Koëfficienten der Längenausdehnung für Platin, Glas, Stahl u. s. w. zu erhalten.

Bezeichnen wir die Länge eines Körpers bei 0° C. mit L_o, den Ausdehnungskoëfficienten seiner Substanz mit a, so haben wir für die Länge L_t, welche er bei t^0 Celsius einnehmen wird:

$$L_t = L_o\,(1 + at).$$

Mannigfache praktische Anwendungen, welche man von der Ausdehnung fester Körper durch die Wärme macht, wollen wir hier bloß andeuten.

Da alle Körper sich durch die Wärme ausdehnen, so wird ein aus einer einfachen Stange gebildetes Pendel bei höherer Temperatur länger sein als bei niedriger, es wird im Sommer langsamer schwingen als im Winter, und wenn ein solches Pendel zur Regulierung einer Uhr angewandt wird, so ist der Gang der Uhr von der Temperatur abhängig. Man hat deshalb gesucht Pendel zu konstruieren, bei denen der Einfluß der Temperatur aufgehoben oder kompensiert ist und die deshalb auch Kompensationspendel genannt werden. Zu diesen Pendeln gehören die nach ihrer Form so genannten Rostpendel, welche aus einer Verbindung von Stangen verschiedener Metalle bestehen. Fig. 521 stellt ein Kompensationspendel dar. An einem kurzen Stück einer Stahlfeder, mittels dessen das ganze Pendel aufgehängt ist, ist das horizontale Querstäbchen ab befestigt, welches die beiden mit R bezeichneten Eisenstäbe trägt. Unten sind die beiden Stäbe R durch das horizontale die beiden Zinkstäbe T tragende Querstäbchen fg verbunden. Auf dem oberen Ende der

Zinkstäbe T ist ferner das Querstäbchen cd befestigt, an welchem endlich der Eisenstab S hängt, welcher frei durch eine Höhlung des Querstabes fg hindurchgeht und die Pendellinse trägt. Durch eine thermische Verlängerung der Eisenstäbe R wird das Querstück fg gesenkt und dadurch ebenso wie durch die Verlängerung von S die Pendellänge vergrößert, während durch die Verlängerung der Zinkstäbe T das Querstäbchen cd gehoben und also das Pendel verkürzt wird. Die Gesamtlänge L des Pendels ist nun:

$$L = R + S - T.$$

Bei einer Temperaturerhöhung von t^0 dagegen ist die Länge des Pendels:

$$L_t = (R + S)\,(1 + 0{,}0000122\,t) - T\,(1 + 0{,}0000294\,t).$$

Soll nun die Schwingungsdauer des Pendels unveränderlich sein, so muß es bei jeder Temperatur gleiche Länge haben; es muß also $L = L_t$ sein. Dies ist der Fall, wenn

$$(R + S)\; 0{,}0000122\,t = T\,.\,0{,}0000294\,t$$

oder wenn

$$(R + S) : T = 294 : 122,$$

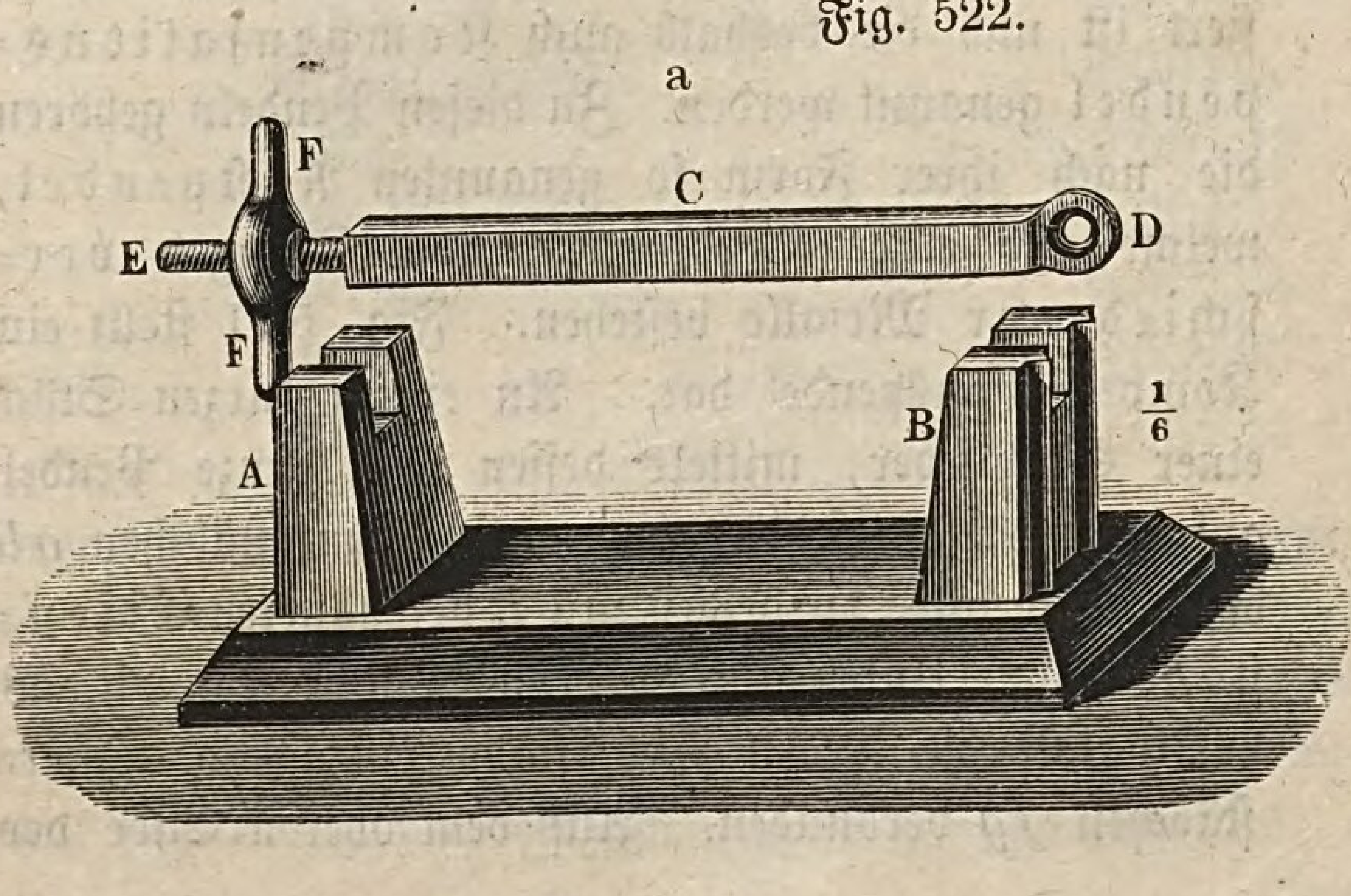
d. h. wenn die Länge des Eisenstabes S und eines der Eisenstäbe R zusammen sich zu der Länge eines der Zinkstäbe T umgekehrt verhält wie der Ausdehnungskoëfficient des Eisens zu dem des Zinks.

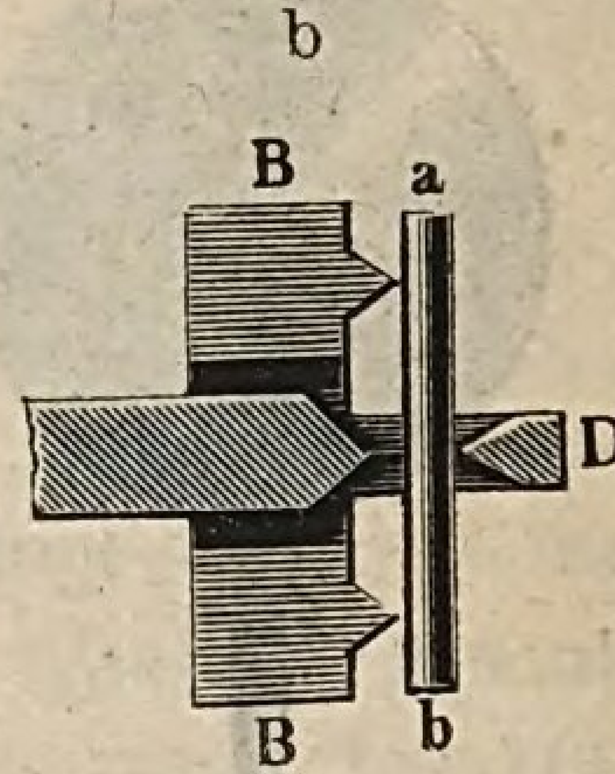
Kompensationspendel aus Eisen- und Messingstäben sind komplizierter; sie bestehen aus 5 Eisen- und 4 Messingstäben.

Die Ausdehnung der Körper durch die Wärme findet mit großer Kraft statt, d. h. es können sehr bedeutende Hindernisse, welche der Ausdehnung entgegenstehen, überwunden werden. Ebenso zieht sich ein Körper beim Erkalten mit großer Kraft zusammen. Legt man einen heißen eisernen Reif um ein Rad, so daß er eben paßt, so wird nach der Erkaltung der Reif das Rad so fest zusammenhalten, wie man es auf keine andere Weise zu erreichen im Stande wäre.

Um durch einen Versuch zu zeigen, wie groß die Kraft ist, mit welcher sich das Eisen beim Erkalten zusammenzieht, kann man den Apparat Fig. 522

Fig. 522.





benutzen. In den Ausschnitt zweier Ständer *A* und *B* eines starken gußeisernen Stativs wird eine vorher rotglühend gemachte schmiedeiserne Stange *C* eingelegt, deren quadratischer Querschnitt 15 mm Seitenlänge hat und welche einerseits mit einem innen scharfkantigen Ringe *D*, andererseits mit einer Schraubenspindel *E* endigt, auf welche die Schraubenmutter *F* paßt. Sobald der glühende Stab *C* eingelegt ist, wird durch den Ring *D* ein Stäbchen *ab* von Gußeisen eingesenkt und dann die Schraubenmutter fest angezogen. Wenn nun der Stab *C* erkaltet, was man durch Aufgießen von kaltem Wasser beschleunigen kann, so bricht das Stäbchen *ab* mit scharfem Knall in der Mitte entzwei, wobei die Stücke weit fortgeschleudert werden.

Die kubische Ausdehnung ist die Vergrößerung, welche das 257
Volumen eines Körpers durch die Temperaturerhöhung erleidet. Auch hier wird das Volumen des Körpers bei 0° zum Ausgangspunkte genommen, und unter dem Ausdehnungskoëfficienten versteht man hier die Zahl, welche angiebt, um den wievielsten Teil seines ursprünglichen Volumens bei 0° sich ein Körper ausdehnt, wenn man ihn um 1° erwärmt. Wenn man sagt, der Ausdehnungskoëfficient des Quecksilbers sei 0,00018, so heißt das, das Quecksilber dehnt sich bei einer Temperaturerhöhung von 1° um $^{18}/_{100000}$ seines Volumens bei 0° aus. Kennt man den Ausdehnungskoëfficienten und das Volumen eines Körpers bei 0°, so kann man sein Volumen für eine beliebige Temperatur berechnen, vorausgesetzt, daß die Ausdehnung des Körpers bis zu dieser Temperatur regelmäßig ist.

Bei tropfbar-flüssigen und gasförmigen Körpern wird durch den Versuch unmittelbar die körperliche Ausdehnung bestimmt, während bei festen Körpern die körperliche Ausdehnung aus der beobachteten linearen berechnet werden kann.

Der Ausdehnungskoëfficient für die körperliche Ausdehnung fester Körper ist dreimal so groß als der Ausdehnungskoëfficient für lineare Ausdehnung.

Man kann sich davon durch folgende Schlußweise überzeugen. Es sei l die Seite eines Würfels bei 0°, so ist l^3 das Volum desselben, welches wir mit v bezeichnen wollen; wenn nun der Würfel um 1° erwärmt wird, so ist jede Seite $l\,(1 + a)$, wenn a den Koëfficienten für die Längenausdehnung bezeichnet, mithin ist jetzt der Inhalt des Würfels:

$$v' = l^3\,(1 + a)^3 = l^3\,(1 + 3\,a + 3\,a^2 + a^3).$$

Da aber a eine sehr kleine Größe ist, so kann man die höheren Potenzen derselben vernachlässigen, und der Wert von v' reduziert sich demnach auf

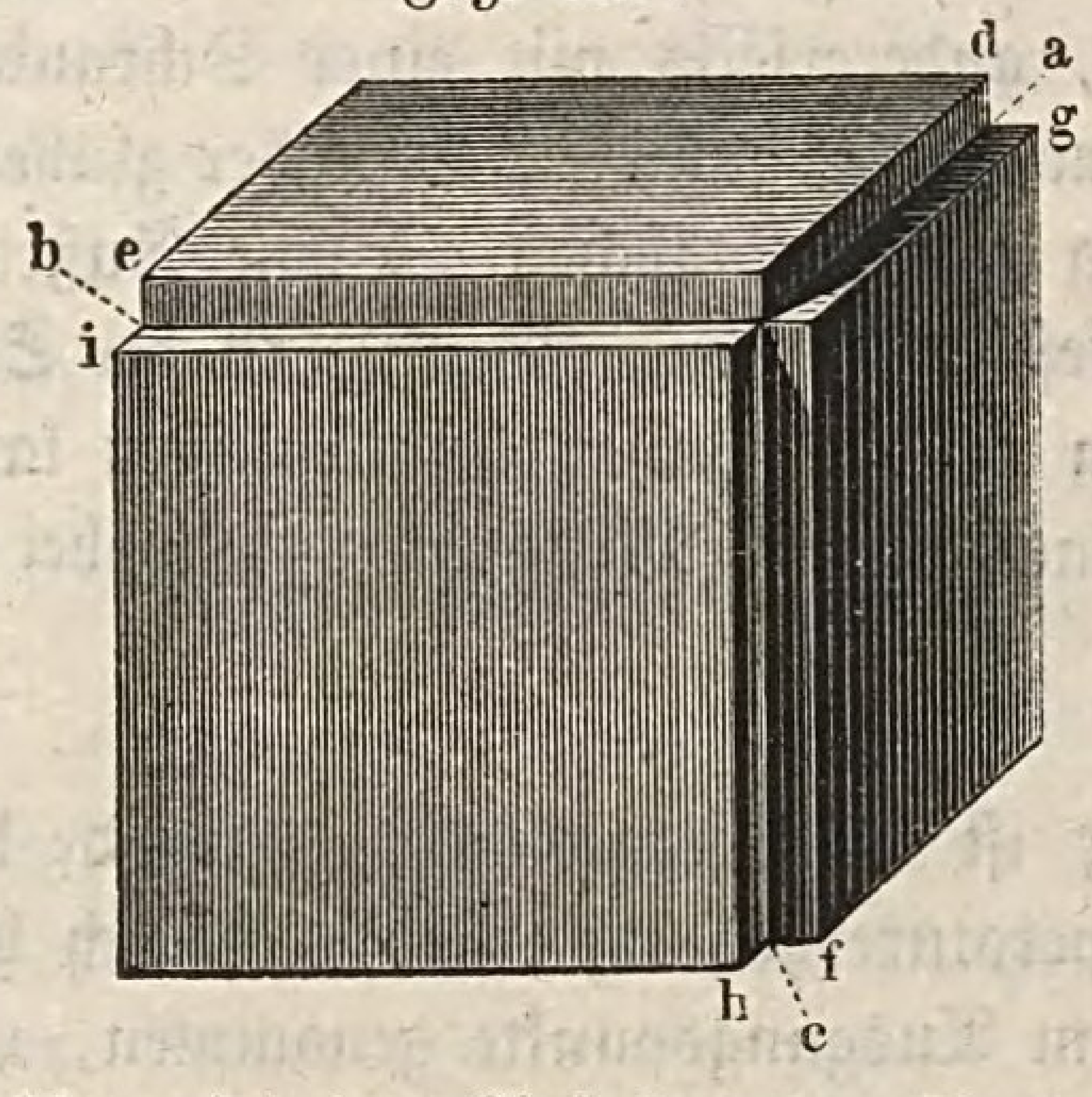
$$v' = l^3\,(1 + 3\,a) = v\,(1 + 3\,a).$$

Bei einer Temperaturerhöhung von 1° ist also das Volumen v um $3\,av$ gewachsen, der Ausdehnungskoëfficient für das Volumen ist also $3\,a$, während a der Längenausdehnungskoëfficient ist.

Wir wollen versuchen, diesen Satz noch auf geometrischem Wege anschaulich zu machen.

Es sei *abc*, Fig. 523, ein aus irgend einem festen Körper gebildeter Würfel bei 0°. Wenn nun dieser Würfel bei einer Temperaturerhöhung

Fig. 523.



von 1° sich nur nach oben ausdehnte, so würde seine Seite um $bc = a \, . \, l$ und sein Volumen somit um die quadratische Platte $adeb = l^2 \, . \, al$ zunehmen, deren Inhalt aber auch gleich av ist, wenn v das Volumen des ursprünglichen Würfels ist und a die obige Bedeutung hat. Wenn sich der Würfel nur nach der rechten Seite hin ausdehnte, so würde er hier um eine eben so große Platte *agfc* wachsen; und eine dritte Platte *chib* endlich, deren Inhalt gleichfalls av ist, wird das Resultat der Ausdehnung des Körpers nach vorn sein. Der kubische Inhalt dieser drei Platten zusammen ist also $3\,av$. Zur Vollendung des durch die Wärme vergrößerten Würfels müßte freilich noch der Inhalt der Ecken hinzuaddiert werden, welche da einzupassen sind, wo je zwei der eben betrachteten Platten mit einer Kante zusammentreffen; allein die Größe derselben ist so unbedeutend, daß sie vernachlässigt werden kann, da ja die Größe der linearen Ausdehnung *be* sehr klein ist im Vergleich zu der Länge der Seiten des ursprünglichen Würfels, und man kann also $3\,av$ ohne merklichen Fehler für die ganze Zunahme des Volumens annehmen.

Der Koëfficient für die Längenausdehnung des Glases z. B. ist 0,0000087; bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 100° wird demnach eine Glasmasse um $3 \, . \, 0{,}00087 = 0{,}00261$ ihres Volumens zunehmen; dasselbe gilt natürlich auch vom Inhalte eines Glasgefäßes. Wenn ein Glasgefäß bei 0° gerade 1000 ccm faßt, so wird sein Inhalt bei 100° bis auf 1002,61 ccm gewachsen sein.

258 **Ausdehnung der Flüssigkeiten.** Um die Ausdehnung verschiedener flüssiger Körper zu bestimmen, kann man den Apparat Fig. 524 anwenden. Der Hals eines kugelförmigen Glasgefäßes von 3 bis 4 cm Durchmesser ist an einer Stelle ganz eng ausgezogen, so daß sich über der engen Stelle gewissermaßen ein Trichter befindet. Die engste Stelle des Halses *a* ist auf irgend eine Weise bezeichnet. Man füllt nun die Kugel mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, so daß sie noch über *a* hinaus im Trichter steht, und kühlt das Ganze bis auf 0° ab, indem man den ganzen Apparat mit schmelzendem Schnee oder schmelzendem Eise umgiebt. Ist Alles bis auf 0° erkaltet, so entfernt man alle Flüssigkeit, welche noch über der Marke steht. Wenn man die so gefüllte Kugel wiegt und vom gefundenen Gewichte das des Glasgefäßes abzieht, so erhält man das Gewicht der Flüssigkeit, welche bei 0° in die Kugel geht. Sobald man die Kugel erwärmt, dehnt sich die Flüssigkeit aus und steigt über die Marke *a* in den Trichter. Hat man bis zu einer bestimmten Temperatur,

etwa bis auf 100°, erwärmt, so nimmt man alle über *a* stehende Flüssigkeit wieder weg und wiegt dann noch einmal. Nach den beiden Wägungen läßt sich dann leicht die Ausdehnung berechnen.

Die auf diese Weise bestimmte Ausdehnung ist nur die scheinbare; die wahre Ausdehnung der Flüssigkeit findet man erst, wenn man zu der scheinbaren Ausdehnung noch die Vergrößerung addiert, welche der Inhalt des Glasgefäßes durch die Wärme erleidet.

Bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 100° dehnen sich aus:

Quecksilber	um 0,0181	Olivenöl . . .	um 0,0911
Wasser	„ 0,0431	Weingeist . . .	„ 0,1296

ihres Volumens bei 0°. Bei Weingeist und Öl ist also die Ausdehnung durch die Wärme sehr bedeutend, so daß im Handel auf diesen Umstand wohl Rücksicht genommen werden muß.

Um unmittelbar anschaulich zu machen, daß verschiedene Flüssigkeiten sich bei gleicher Temperaturerhöhung ungleich stark ausdehnen, fülle man Glaskölbchen, welche bis zu einer am unteren Ende ihres langen Halses, Fig. 525, ange-

Fig. 524.

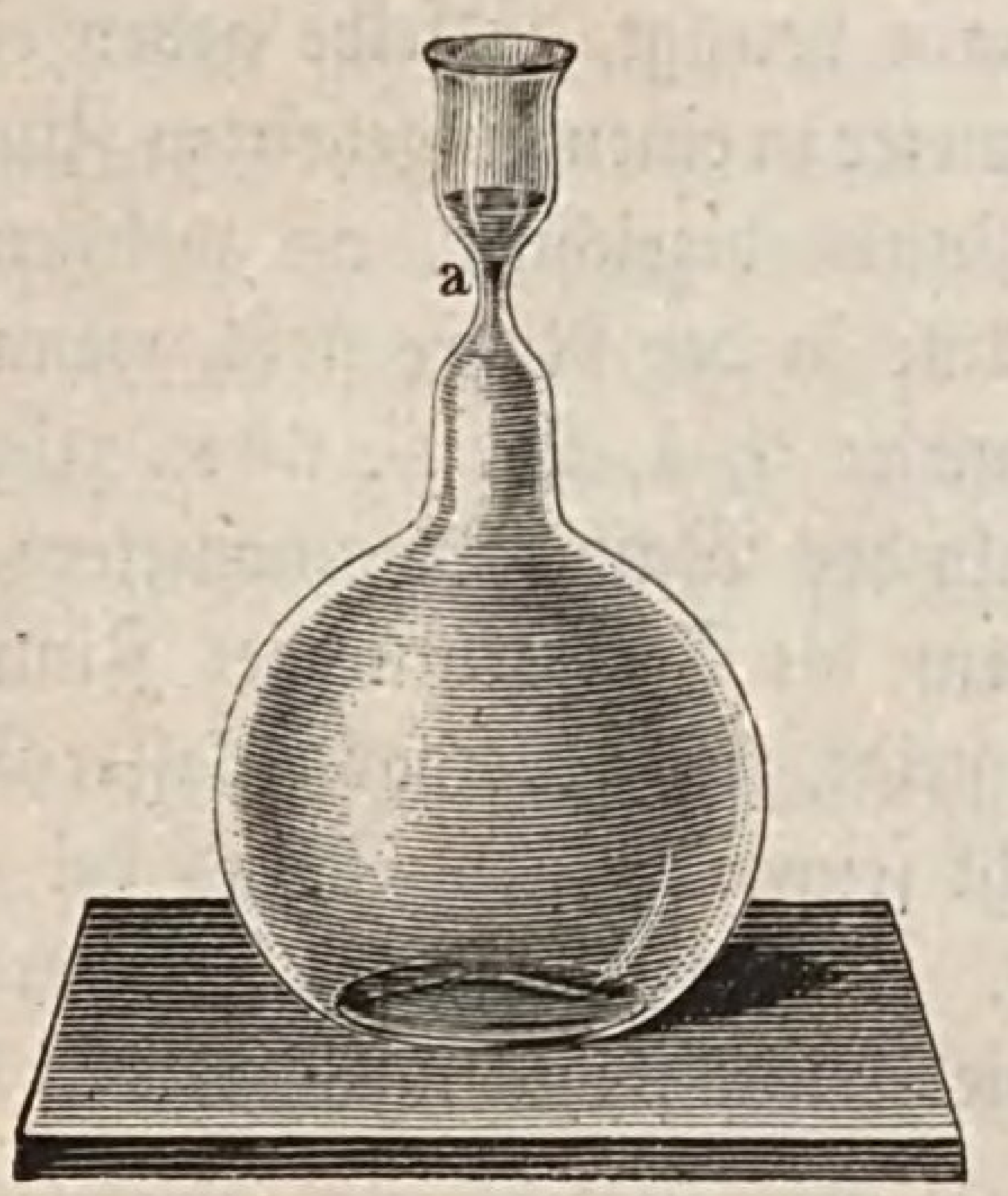
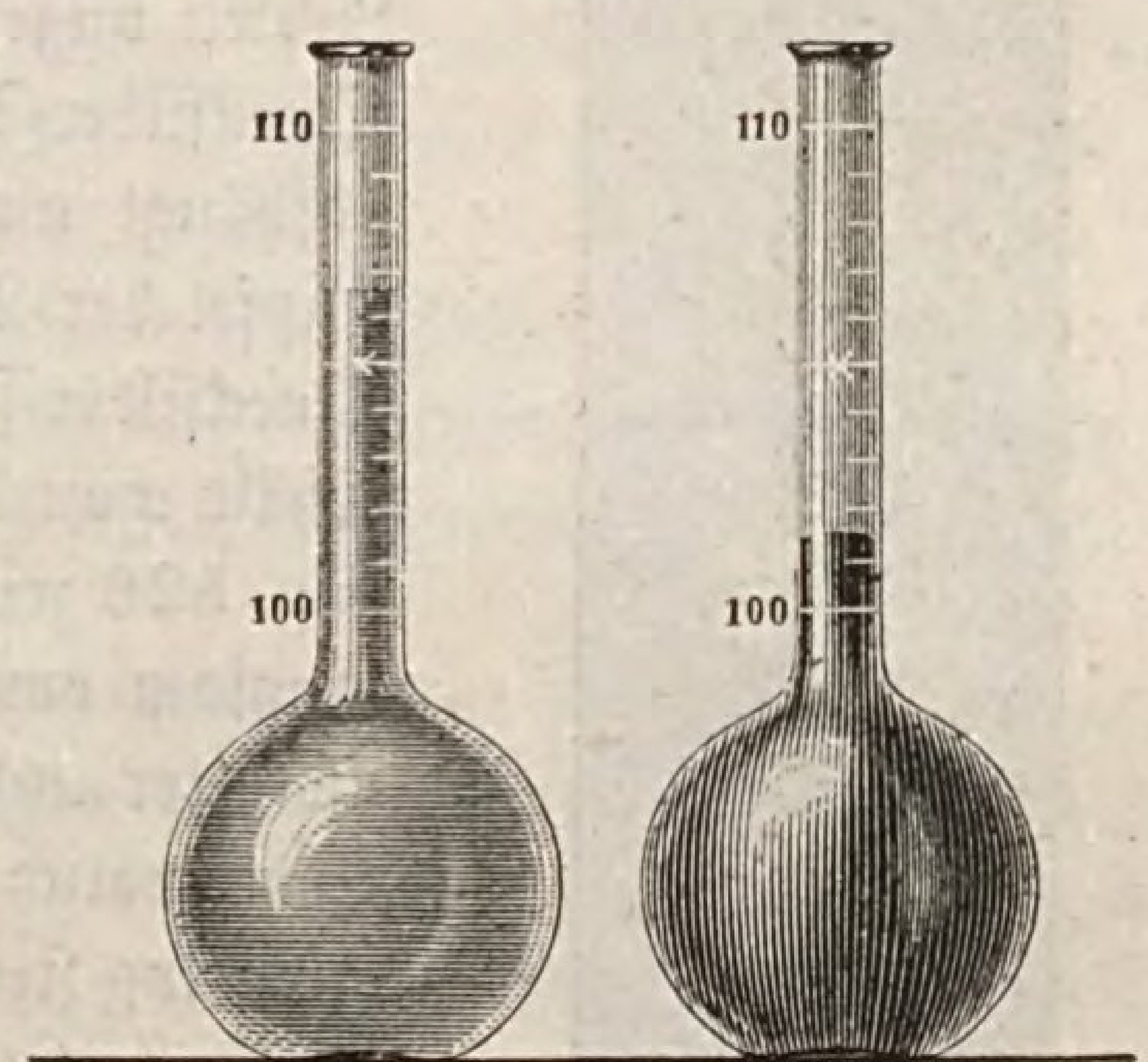


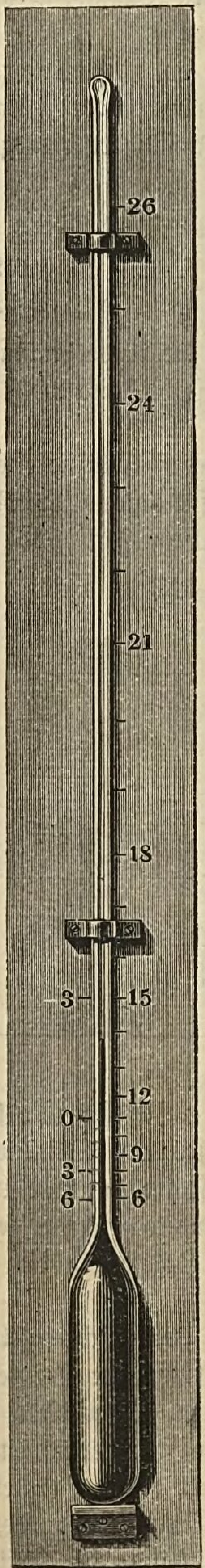
Fig. 525.



brachten Marke gerade 100 ccm enthalten, bei 0° bis zu dieser Marke mit verschiedenen Flüssigkeiten, eines etwa mit Wasser, eines mit Olivenöl, ein drittes mit Petroleum u. s. w. Erwärmt man nun die Kölbchen allmählich bis zu 100°, so steigt die Flüssigkeit in dem in einzelne Kubikcentimeter geteilten Halse der verschiedenen Kölbchen bis zu sehr ungleicher Höhe, wie die Figur andeutet.

Die meisten Flüssigkeiten dehnen sich zwischen 0 und 100° nicht regelmäßig aus. Am besten läßt sich dies zeigen, wenn man Thermometer von verschiedenen Flüssigkeiten konstruiert und ihren Gang mit einem Quecksilber-Thermometer vergleicht. Wenn man z. B. an einem Weingeist-Thermometer auf die gewöhnliche Weise den Nullpunkt bestimmt, alsdann durch Vergleichung mit einem Quecksilber-Thermometer die höher gelegenen Temperaturgrade, etwa von 10 zu 10° markiert, so zeigt es sich, daß die Abstände der Teilstriche

Fig. 526.



um so größer werden, je höher die den letzteren entsprechenden Temperaturen sind. Hieraus folgt, daß der Weingeist sich nicht gleichförmig ausdehnt, daß seine Ausdehnung mit der steigenden Temperatur zunimmt.

Das Volumen bei 0° gleich 1 gesetzt, ist das Volumen bei t^0 für Alkohol (specif. Gewicht 0,809, Siedepunkt 78,4° C.)

$$V = 1 + 0{,}0010414\, t + 0{,}000000784\, t^2 + 0{,}00000001762\, t^3$$

und für Äther (specif. Gewicht 0,7366, Siedepunkt 34,9° C.)

$$V = 1 + 0{,}0014803\, t + 0{,}0000035032\, t^2 + 0{,}00000002701\, t^3.$$

Am auffallendsten sind die Ausdehnungsverhältnisse des Wassers. Wenn man ein Wasser-Thermometer herstellt, dessen Gefäß ungefähr 150 ccm Inhalt hat, während der Durchmesser der Röhre im Lichten ungefähr 1 mm beträgt, dasselbe neben einem Quecksilber-Thermometer in einem ungeheizten Zimmer aufhängt und die Punkte bezeichnet, an welchen der Gipfel der Wassersäule in der Röhre steht, wenn das Quecksilber-Thermometer 0, 1, 2 . . . 6° ꝛc. zeigt, so erhält man die Skala des Wasser-Thermometers, wie Fig. 526 zeigt. Wenn die Temperatur des Zimmers langsam von 0° an steigt, so fällt das Wasser-Thermometer und erreicht seinen tiefsten Stand bei einer Temperatur von 6°. Bei fortdauernder Temperaturerhöhung steigt es wieder und steht ungefähr bei 11° C. ebenso hoch wie bei 0°.

Wenn man die Ausdehnung des Glasgefäßes in Rechnung zieht, so ergiebt sich, daß ohne dieselbe das Wasser-Thermometer bei 4° seinen tiefsten Stand erreichen würde, daß also bei 4° C. das Wasser ein Dichtigkeitsmaximum hat, oder mit anderen Worten, daß Wasser von 4° C. sich ausdehnt, mag es nun erwärmt oder abgekühlt werden.

Um das Dichtigkeitsmaximum des Wassers durch einen Vorlesungsversuch zu demonstrieren, hat Steinhauser den aus dunkelfarbigem Glas verfertigten Schwimmer (Fig. 527) konstruiert, welcher so justiert ist, daß er bei ungefähr 3° C. so viel wiegt, wie ein gleiches Volumen Wasser von gleicher Temperatur. In einem mit Wasser von 0° gefüllten etwa 3 cm

weiten Glascylinder sinkt er unter, sobald er gleichfalls auf 0° erkaltet ist; bringt man aber diesen Glascylinder in ein geheiztes Zimmer, so wird der Schwimmer nach einiger Zeit bis zum Wasserspiegel in die Höhe steigen, wenn die Temperatur des Wassers auf 3° C. gestiegen ist, und sinkt dann bei fortdauernder Erwärmung des Wassers wieder, wenn dessen Temperatur ungefähr 9° erreicht hat. Daraus folgt, daß das Wasser zwischen 3 und 9° ein größeres specifisches Gewicht hat als der Schwimmer, daß es also innerhalb dieser Temperaturen ein Dichtigkeitsmaximum hat.

Fig. 527.



$\frac{1}{2}$

Dieses merkwürdige Verhalten des Wassers ist für die meteorologischen Verhältnisse der Erdoberfläche von der höchsten Wichtigkeit.

Mit dem Dichtigkeitsmaximum des Wassers dürfte wohl die auffallende Erscheinung im Zusammenhang stehen, daß das Wasser beim Übergang in Eis eine bedeutende Ausdehnung erfährt. Das specifische Gewicht des luftfreien Eises ist 0,9, weshalb das Eis selbst auf kochendem Wasser schwimmt.

Die bei der Eisbildung stattfindende Raumvergrößerung geht mit solcher Gewalt vor sich, daß vollständig mit Wasser gefüllte und wohl verschlossene Gefäße infolge der Eisbildung bersten. Selbst eiserne Bombenkugeln, welche mit Wasser gefüllt waren und deren Öffnung man sorgfältig verschraubt hatte, zersprangen, als man sie einer so niedrigen Temperatur aussetzte, daß das eingeschlossene Wasser zum Gefrieren gebracht wurde.

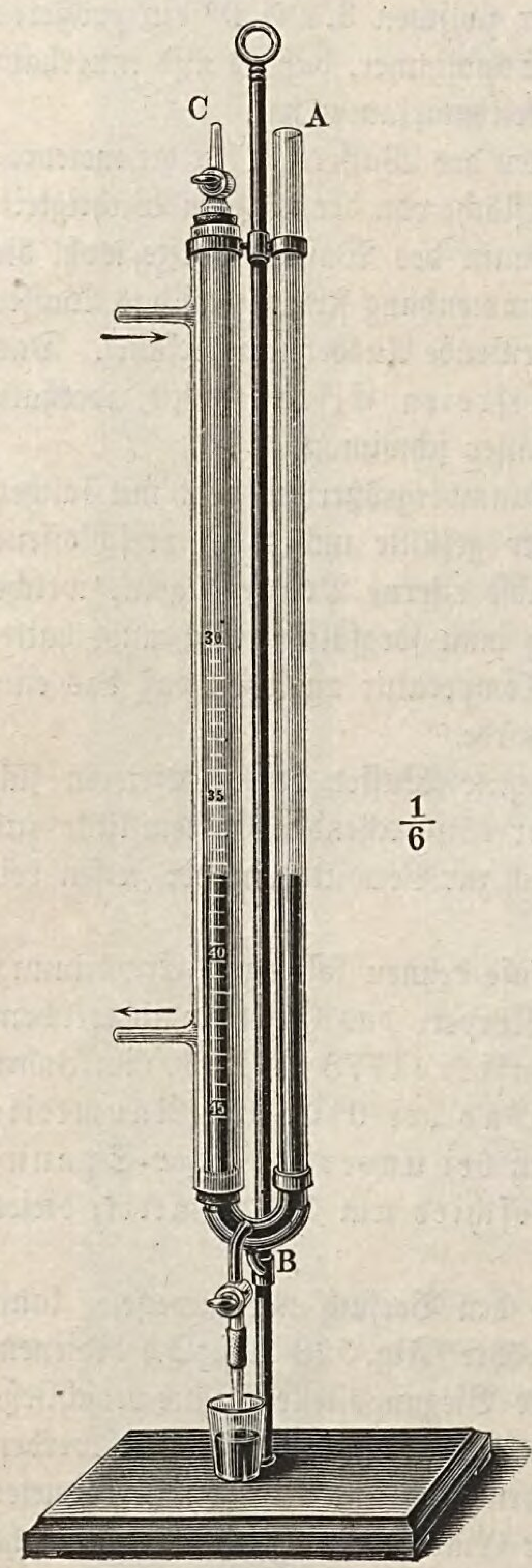
Wenn das in Gesteinspalten eingedrungene Wasser beim Gefrieren sich ausdehnt, so hat dies eine Zertrümmerung der entsprechenden Gesteinstücke zur Folge, und somit trägt die Eisbildung wesentlich zur Verwitterung der Felsen bei.

Ausdehnung der Gase. Die Gase dehnen sich durch Erwärmung weit stärker aus als die festen und flüssigen Körper; das Gesetz, nach welchem ihre Ausdehnung erfolgt, wurde von Gay-Lussac (1778 bis 1850) im Jahre 1802 aufgestellt und lautet: Wenn ein Gas bei 0° C. 273 Raumteile einnimmt, so ändert sich dessen Volum bei unveränderter Spannkraft für jeden Grad Temperaturunterschied um 1 Raumteil; dieses Gesetz ist für alle Gase gleich. 259

Um das Gay-Lussac'sche Gesetz durch den Versuch nachzuweisen, kann man sich einer zweischenkelig gebogenen Glasröhre (Fig. 528 a. f. S.) bedienen, welche an dem einen Ende A offen ist, an der Biegungsstelle B eine verschließbare Seitenröhre hat und am anderen Ende C gleichfalls geschlossen werden kann. Der verschließbare Schenkel ist von oben nach unten in Kubikcentimeter geteilt und seiner ganzen Länge nach von einer Glasröhre umgeben, durch welche Dampf geleitet werden kann. Zur Ausführung des Versuchs verschließt man die Seitenröhre, gießt dann in den offenen Schenkel des Apparates bei einer Temperatur von 0° C. so viel Quecksilber, bis der andere Schenkel, welcher noch geöffnet ist, genau 27,3 ccm Luft enthält, worauf auch dieser geschlossen wird. Die Quecksilberspiegel stehen jetzt in beiden Schenkeln gleich hoch; somit stimmt die Spannkraft der inneren Luft mit der äußeren überein. Nun leitet man Wasser-

dampf, der in einem in der Nähe befindlichen Gefäße entwickelt wird, durch das Dampfrohr und läßt, um die Luft bei unveränderter Spannkraft zu erhalten, aus der Seitenröhre so viel Quecksilber abfließen, daß dasselbe in beiden Schenkeln gleich hoch stehen bleibt. Hat die erhitzte Luft eine Temperatur von 100° C. angenommen, so beobachtet man, daß ihr Volumen 37,3 ccm beträgt; es dehnen sich somit bei unveränderlicher Spannkraft durch eine Erwärmung von 0° auf 100° C. 273 Raumteile Luft um 100 Raumteile aus. — Leitet man statt Wasserdampf Dämpfe von Weingeist, der bei 80° siedet, durch das Dampfrohr, so findet man, daß bei einer Erwärmung von 0° auf 80° 273 Raumteile Luft sich um 80 Raumteile ausdehnen. Es dehnen sich also bei unveränderlicher Spannkraft 273 Raumteile Luft von 0° Temperatur für jeden Grad Erwärmung um 1 Raumteil aus. — Dasselbe Ergebnis erhält man auch, wenn man den Versuch mit irgend einem anderen Gase wiederholt.

Fig. 528.



Das Gay-Lussac'sche Gesetz kann noch einfacher ausgedrückt werden, wie aus folgender Betrachtung hervorgeht. Angenommen eine Gasmenge messe

bei 0° C. 273 Raumteile, so mißt sie bei t° C. $273 + t$ Raumteile,

bei 0° C. 1 Raumteil, so mißt sie bei t° C. $(273 + t) : 273$ Raumteile,

bei 0° C. v_0 Raumteile, so mißt sie bei t° C. $v_0\,(273 + t) : 273$ Raumteile.

Bezeichnet man das Volum der Gasmenge, welche bei 0° C. v_0 Raumteile einnimmt, bei t° C. mit v, so ist daher

$$v = v_0\,(273 + t) : 273.$$

Ebenso ist, wenn man das Volum derselben Gasmenge bei t'° C. mit v' bezeichnet:

$$v' = v_0\,(273 + t') : 273.$$

Dividiert man die erste der beiden Gleichungen durch die zweite, so erhält man:

$$v : v' = (273 + t) : (273 + t'),$$

d. h. die Volume verhalten sich wie ihre um 273° vermehrten Temperaturgrade nach Celsius. Um diesen Satz auf die kürzeste Form zu bringen, ist man übereingekommen, die um 273° vermehrten Ablesungen des Thermometers nach Celsius

als absolute Temperaturen zu bezeichnen. Mit Festhaltung dieses Begriffs lautet dann das Gay-Lussac'sche Gesetz: Die Volume derselben Gasmenge verhalten sich bei unveränderter Spannkraft wie ihre absoluten Temperaturen.

Das Gay-Lussac-Mariotte'sche Gesetz. Dasselbe 260
drückt die Beziehung zwischen Volum, Temperatur und Spannkraft derselben Gasmenge aus, wenn diese drei Größen veränderlich sind, und lautet: Die Volume derselben Gasmenge verhalten sich wie die Quotienten aus den absoluten Temperaturen durch die Spannkräfte. Die Ableitung ergiebt sich in folgender Weise: Eine Gasmenge habe

bei der absoluten Temperatur T und der Spannkraft p das Volum v, ferner
" " " " T' " " " p " " v_1, endlich
" " " " T' " " " p' " " v',

dann verhält sich nach dem Gay-Lussac'schen Gesetze:

$$v : v_1 = T : T'$$

und nach dem Mariotte'schen Gesetze:

$$v' : v_1 = p : p'.$$

Dividiert man die erste Proportion durch die zweite, so erhält man:

$$v : v' = \frac{T}{p} : \frac{T'}{p'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

was mit dem aufgestellten Gesetze übereinstimmt.

Da sich die Volume derselben Gasmenge umgekehrt verhalten wie ihre specifischen Gewichte, so verhalten sich die specifischen Gewichte eines Gases auch umgekehrt wie die Quotienten aus den absoluten Temperaturen durch die Spannkräfte oder direkt wie die Quotienten aus den Spannkräften durch die absoluten Temperaturen. Bezeichnet man daher mit s und s' die specifischen Gewichte eines Gases beziehungsweise bei den absoluten Temperaturen T und T' und den Spannkräften p und p', so ist:

$$s : s' = \frac{p}{T} : \frac{p'}{T'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Wird ein Gas, welches in einem Gefäße von unveränderlichem Volum eingeschlossen ist, erwärmt oder abgekühlt, so nimmt seine Spannkraft zu oder ab. Das Gesetz, nach welchem diese Änderung erfolgt, ergiebt sich aus Gleichung 1), wenn man in derselben $v = v'$ setzt; man erhält alsdann nach einer leichten Umformung:

$$p : p' = T : T' \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

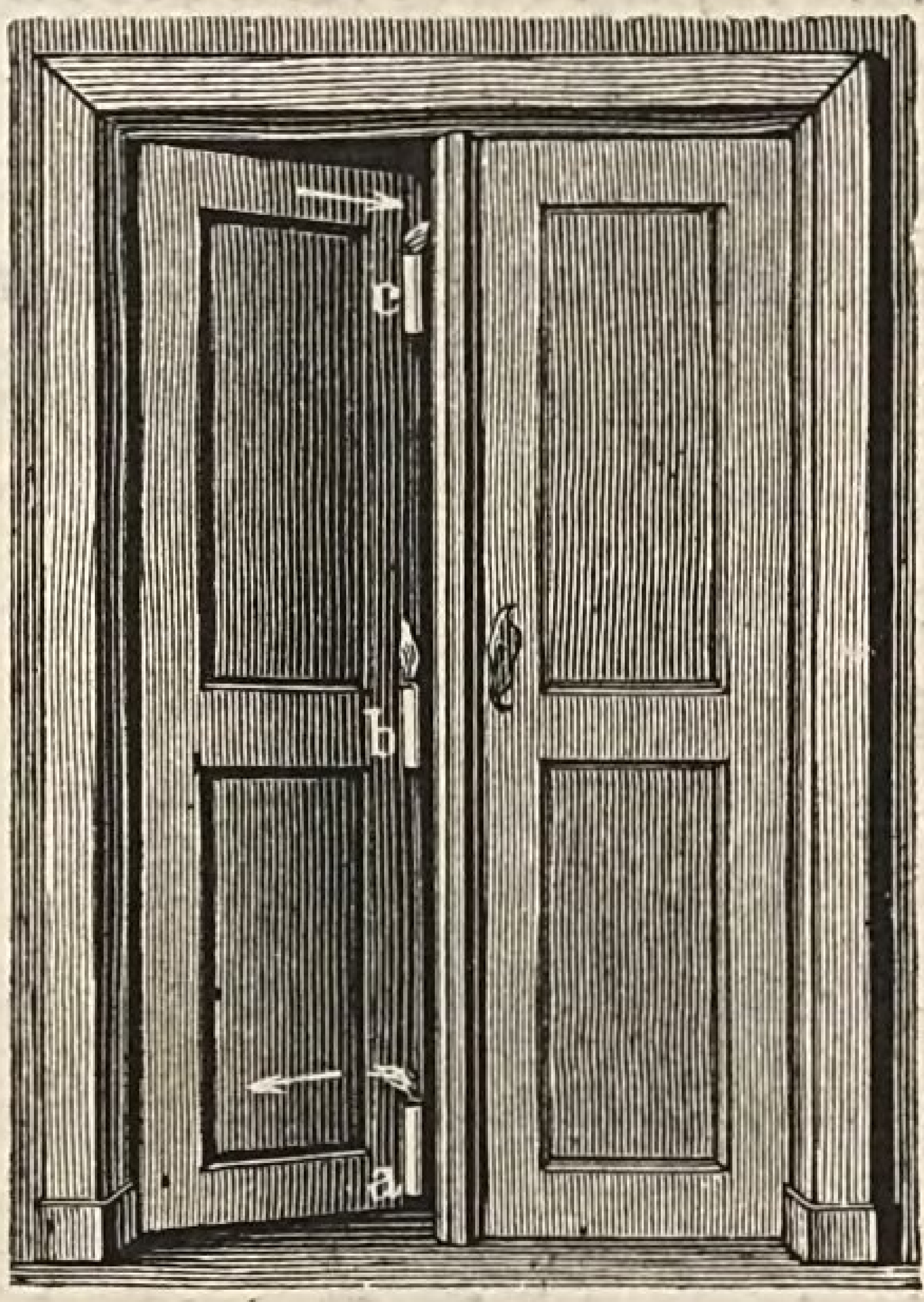
d. h. die Spannkraft eines Gases von unveränderlichem Volum verhält sich wie seine absolute Temperatur.

Da die erwärmte Luft specifisch leichter ist als die kalte, so wird jene in dieser aufsteigen, während diese in jener zu Boden sinkt. In einem geheizten

Zimmer steigt die warme Luft an die Decke und entweicht hier durch alle Ritzen und Fugen, während unten kalte Luft nachströmt.

Wenn man im Winter die in einen kalten Raum führende Thür eines geheizten Zimmers etwas öffnet und eine brennende Kerze an das obere Ende des Spaltes hält, wie man Fig. 529 sieht, so zeigt die nach außen gerichtete Flamme einen von dem warmen Zimmer nach dem kalten Raume gerichteten Luftstrom an. Rückt man nun mit der Kerze mehr und mehr herunter, so stellt sich die Flamme immer mehr und mehr aufrecht, ungefähr in der halben Höhe der Öffnung steht sie ganz vertikal, da hier keine Luftströmung vorhanden ist; bringt man sie aber noch weiter herunter, so wird die Flamme von außen nach innen getrieben. Man sieht also, daß die erwärmte Luft oben aus- und daß dagegen unten die kalte Luft in das Zimmer einströmt.

Fig. 529.



Daher kommt es, daß es am Boden eines geheizten Zimmers weit kälter ist als an der Decke, und sich hohe Zimmer schwerer heizen als niedrige.

In einem Schornsteine wird die Luft durch das Feuer erwärmt, die erhitzte Luft steigt in die Höhe, und von unten her dringt kalte Luft ein, welche durch das Feuer streicht und diesem stets Sauerstoff zuführt. Der durch den Schornstein bewirkte Luftzug bringt also die zur Unterhaltung lebhafter Verbrennung nötige Luftmenge in den Feuerraum. Es versteht sich von selbst, daß zwischen der Größe des Feuerraumes und der Höhe und Weite des Schornsteins die richtigen Verhältnisse stattfinden müssen, wenn der Schornstein seinen Zweck möglichst vollständig erfüllen soll.

Auch bei Lampen hat der gläserne Schornstein den Zweck, einen Luftzug zu unterhalten, welcher der Flamme die zur lebhaften Verbrennung nötige Sauerstoffmenge zuführt.

Zweites Kapitel.

Veränderung des Aggregatzustandes.

Das Schmelzen. Die meisten festen Körper können durch hinreichende 261
Temperaturerhöhung *geschmolzen*, d. h. *aus dem festen in den flüssigen Zustand übergeführt werden*, wenn sie nicht schon vorher unter dem Einflusse der Wärme eine chemische Zersetzung erleiden, wie dies vorzugsweise bei organischen Körpern der Fall ist.

Jede Substanz, wenn sie überhaupt schmelzbar ist, hat einen *festen Schmelzpunkt*, d. h. das Schmelzen einer und derselben Substanz findet stets bei derselben Temperatur statt; dagegen weichen die Schmelzpunkte verschiedener Substanzen sehr von einander ab, wie die folgende Tabelle zeigt:

Schmiedeeisen	schmilzt	bei	1500	bis	1600° C.
Stahl	„	„	1300	„	1400 „
Gußeisen	„	„	1050	„	1200 „
Gold	„	„		„	1250 „
Silber	„	„		„	1000 „
Bronze	„	„		„	900 „
Antimon	„	„		„	425 „
Zink	„	„		„	415 „
Blei	„	„		„	330 „
Kadmium	„	„		„	320 „
Wismuth	„	„		„	246 „
Zinn	„	„		„	230 „
Legierung aus 6 Thln. Zinn, 1 Thl. Blei	„	„		„	194 „
Schwefel	„	„		„	109 „
Legierung aus 4 Thln. Wismuth, 1 Thl. Blei, 1 Thl. Zink (Rose'sches Metall)	„	„		„	94 „

Legierung aus 4 Thln. Wismuth, 2 Thln. Blei, 1 Thl. Zinn, 1 Thl. Kadmium (Wood's Metall)	schmilzt bei	71° C.
Natrium	" "	90 "
Kalium	" "	62 "
Phosphor	" "	44 "
Stearinsäure	" "	70 "
Weißes Wachs	" "	64 "
Stearin	" "	51 "
Eis	" "	0 "
Terpentinöl	" "	— 10 "
Quecksilber	" "	— 39 "

Die aufmerksame Betrachtung dieser Tabelle zeigt, daß die Legierungen meist einen tieferen Schmelzpunkt haben als die einzelnen Metalle, aus denen sie zusammengesetzt sind; darauf beruht auch die Anwendung des Schnell-lotes der Blechner, welches eine Legierung von Blei und Zinn ist. Besonders interessant in dieser Beziehung ist die in obiger Tabelle angeführte Rose'sche und Wood'sche Metalllegierung.

262 **Gebundene Wärme.** Es ist eine bedeutende Menge Wärme nötig, um Eis oder Schnee von 0° in Wasser von 0° zu verwandeln. Diese Wärme, welche lediglich dazu verwendet wird, das Eis flüssig zu machen, ohne daß dabei seine Temperatur erhöht wird, welche also für das Gefühl und das Thermometer als verloren erscheint, wird mit dem Namen der gebundenen oder der latenten Wärme des Wassers oder auch als Schmelzungswärme bezeichnet.

Wenn 1 Pfund Wasser von 80° und 1 Pfund Schnee von 0° gemischt werden, so erhält man 2 Pfund Wasser von 0°. Alle Wärme also, welche das heiße Wasser bei seiner Abkühlung von 80° bis auf 0° abgab, ist für das Thermometer spurlos verschwunden; sie ist lediglich dazu verwandt worden, um Schnee von 0° in Wasser von 0° zu verwandeln.

Nehmen wir als Einheit der Wärmemengen dasjenige Wärmequantum an, welches erforderlich ist, um die Temperatur der Gewichtseinheit, z. B. eines Gramms Wasser von 0° auf 1° zu erhöhen, so sind also 80 solcher Wärmeeinheiten nötig, um 1 Gramm Schnee oder Eis von 0° zu schmelzen, oder mit anderen Worten: bei der Schmelzung von 1 Gramm Schnee oder Eis werden 80 Wärmeeinheiten latent oder gebunden. Die latente Wärme des Wassers ist 80.

Manchmal wird als Wärmeeinheit oder Kalorie auch eine 1000 mal größere Wärmemenge, nämlich diejenige angenommen, welche nötig ist, um die Temperatur von 1 Kilogramm Wasser von 0 auf 1° C. zu erhöhen. Aus dem Zusammenhange ergiebt sich jeweils leicht, welche der oben definierten Einheiten gemeint ist.

Diese Wärmemenge, welche beim Schmelzen des Schnees oder des Eises gebunden wird, wird also lediglich dazu verwandt, die Kohäsion zwischen den

Eismolekülen so weit zu überwinden, daß sie mit der größten Leichtigkeit an einander verschoben werden können, daß also die Masse flüssig wird. Die dem Eise zugeführte Wärme ist somit verbraucht worden, um den flüssigen Zustand herzustellen; sie kann daher auch keine Wirkungen mehr hervorbringen und ist deshalb auch mit dem Thermometer nicht mehr nachweisbar.

So wie bei der Schmelzung des Eises und des Schnees Wärme gebunden wird, so ist dies auch beim Schmelzen anderer Körper der Fall. Folgendes sind die Werte der latenten Wärme für einige Körper nach Person's Bestimmungen:

Phosphor	5,0	Blei	5,4
Schwefel	9,4	Zinn	14,2
Salpetersaures Kali . . .	47,4	Zink	28,1

Die Bedeutung dieser Zahlen ist leicht verständlich; zur Schmelzung von 1 g Schwefel sind 9,4, zur Schmelzung von 1 g Blei sind 5,4 Wärmeeinheiten (Kalorieen) nötig.

Es giebt zweierlei Wege einen festen Körper in flüssigen Zustand zu versetzen: 1) durch Schmelzung, indem man ihm von außen her so viel Wärme zuführt, als er aufnehmen muß, um in den flüssigen Zustand überzugehen; oder 2) durch Auflösung, d. h. im allgemeinen dadurch, daß man ihn mit irgend einem anderen Stoffe zusammenbringt, mit welchem er ein flüssiges Gemenge bildet.

Wenn ein Salz durch Auflösung in den flüssigen Zustand übergeführt wird, so findet dabei ebenso ein Verbrauch von Wärme statt, wie beim Schmelzen, und wenn also von außen her keine Wärme zugeführt wird, so kann dieser Wärmeverbrauch offenbar nur auf Kosten der Temperatur des aufzulösenden Salzes und des Lösungsmittels stattfinden, es muß also eine Temperaturerniedrigung entstehen, welche um so bedeutender ist, je mehr Salz aufgelöst wird und je rascher die Auflösung vor sich geht. Durch rasche Auflösung leicht löslicher Salze kann in der That eine bedeutende Temperaturerniedrigung erzielt werden. Ganz besonders eignet sich dazu das salpetersaure Ammoniak. Fig. 530 und Fig. 531 (a. f. S.) stellen einen Apparat im Durchschnitt und in perspektivischer Ansicht dar, welchen Toselli konstruiert hat, um durch rasches Auflösen dieses Salzes Wasser oder andere Substanzen zum Gefrieren zu bringen. In einem Blechcylinder A ist ein hohler Kegel B von dünnem Blech so eingesetzt, daß dadurch die Höhlung von A in zwei Teile geteilt wird, den oben offenen Hohlkegel B und den unten offenen ihn ringförmig umgebenden Hohlraum P. Mittels zweier an A angebrachter Zapfen wird die ganze Vorrichtung auf die Lager eines eisernen Stativs aufgesetzt, wie Fig. 531 zeigt. Zunächst wird nun B ungefähr zu $1/3$ mit kaltem Wasser gefüllt, dann ein Kautschukring und auf diesen ein Holzdeckel aufgelegt, welcher mittels einer Schraube fest aufgedrückt wird. Ist so B geschlossen, so wird der Apparat umgekehrt, der Hohlraum P etwas über die Hälfte seiner Höhe mit salpetersaurem Ammoniak gefüllt und dann kaltes Wasser zugegossen, bis der Raum nahezu gefüllt ist. Nach-

dem alsdann der Hohlraum *P* auf gleiche Weise geschlossen worden ist, wie *B*, wird der ganze Apparat 8 bis 10 Minuten lang in Rotation um seine Achse

Fig. 530.

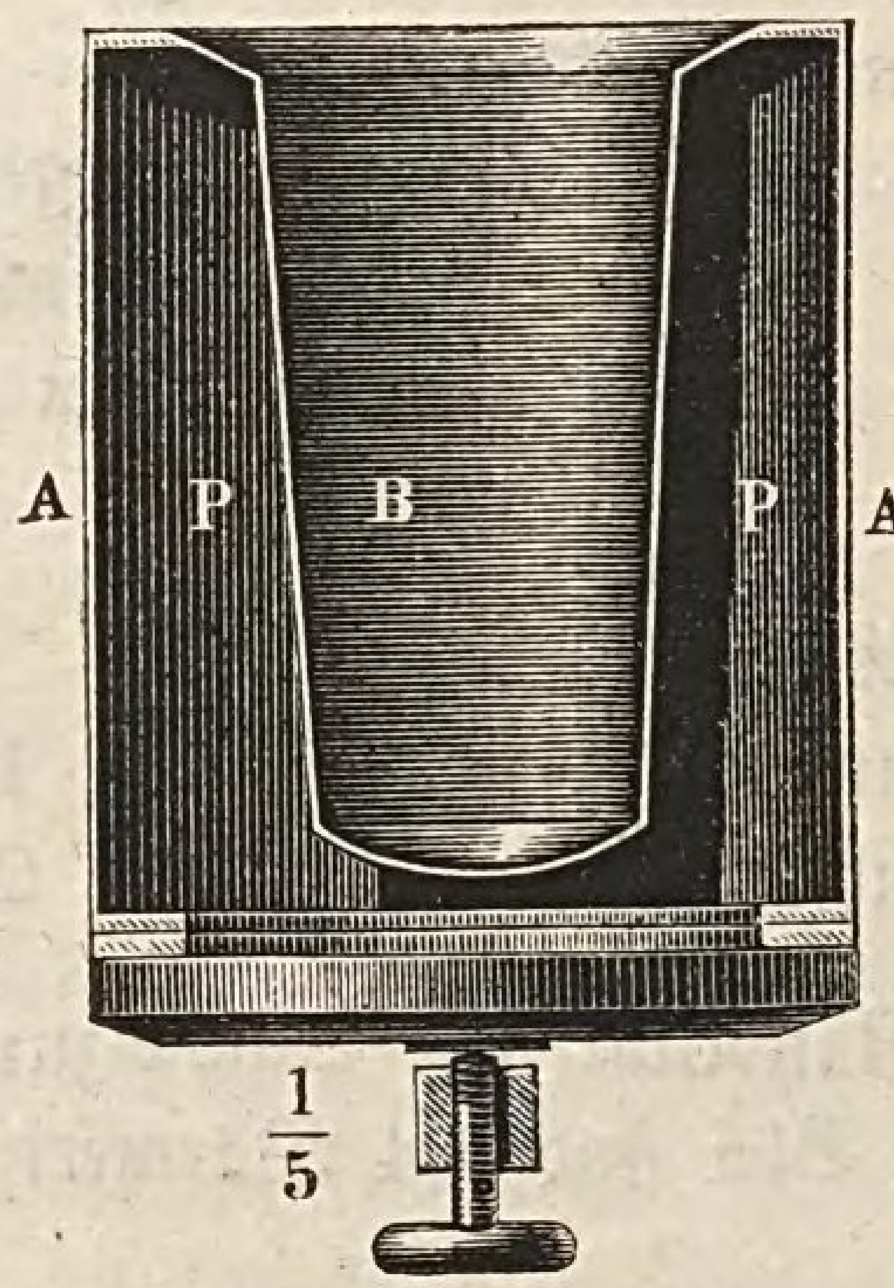
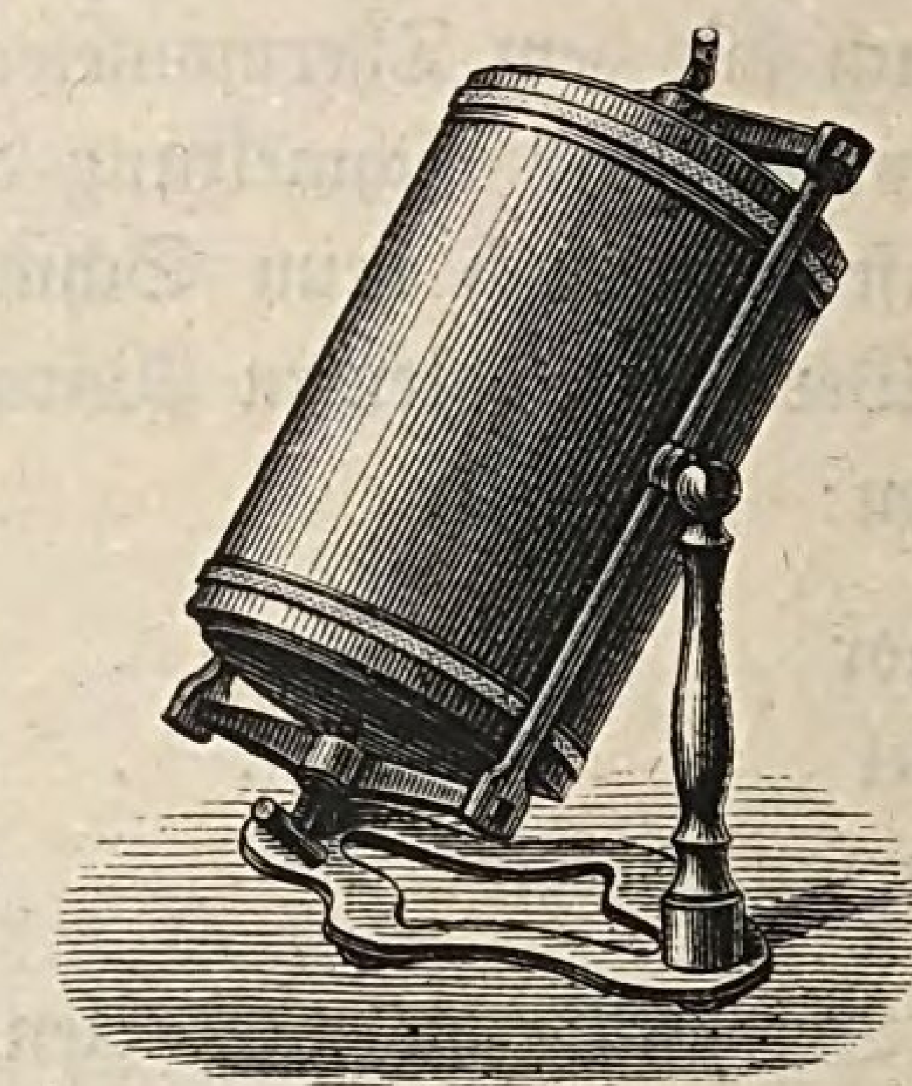


Fig. 531.



erhalten. Es hat sich alsdann in *B* ein hohler Kegel von klarem Eis gebildet, in dessen Innerem meist noch etwas Wasser übrig geblieben ist.

Das aufgelöste Salz kann durch Abdampfen wieder gewonnen werden. — Weit wirksamer als salpetersaures Ammoniak ist ein Gemenge dieses Salzes mit kohlensaurem Natron; da aber hier eine chemische Umsetzung der Salze erfolgt, so kann das einmal gebrauchte Gemisch nicht zum zweitenmale verwendet werden.

Besonders stark ist die Temperaturerniedrigung, wenn zwei feste Körper sich bei ihrer Mischung verflüssigen. So sinkt z. B., wenn man 1 Pfund Kochsalz von 0° mit 3 Pfund Schnee (oder feingestoßenem Eis) mengt, die Temperatur auf — 20° C. Es ist dies die gewöhnliche Kältemischung der Zuckerbäcker. Ein Gemenge von Schnee und Salmiak erkaltet bis auf — 17,7° C., den Nullpunkt des Fahrenheit'schen Thermometers.

263 **Das Erstarren.** Im allgemeinen erstarrt ein flüssiger Körper bei derselben Temperatur, bei der er aus dem festen Zustande in den flüssigen übergeht; die Erstarrungstemperatur eines Körpers fällt also mit seinem Schmelzpunkt zusammen. Schnee von 0° schmilzt und liefert Wasser von 0°, wenn ihm noch Wärme zugeführt, und Wasser, welches bis auf 0° erkaltet ist, erstarrt bei dieser Temperatur, wenn ihm Wärme entzogen wird. — Das Schmelzen des festen Zinns findet ebenso wie das Erstarren des flüssigen bei 230° C. statt.

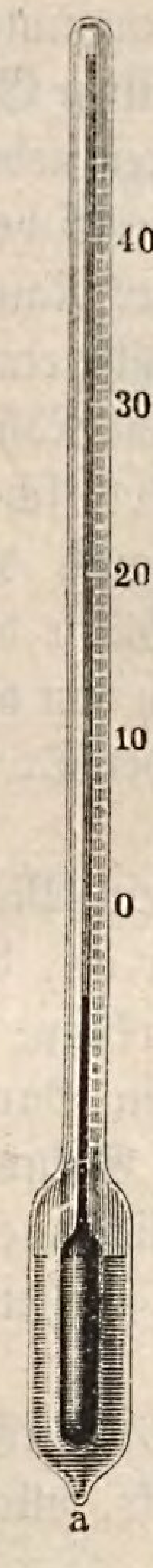
Beim Erstarren eines flüssigen Körpers wird alle Wärme wieder frei, welche bei seinem Schmelzen gebunden wurde. Wenn das Erstarren einer Flüssigkeit bei der normalen Erstarrungstemperatur vor sich geht, so läßt sich die frei werdende Wärme nicht leicht nachweisen, weil das Festwerden ganz allmählich geschieht und das Freiwerden einer bestimmten Wärmemenge sich auf eine so große Zeit verteilt, daß sie sich in die Umgebung verliert, ohne eine

merkliche Temperaturerhöhung hervorbringen zu können. Die Wärme, welche beim Erstarren einiger Partikelchen frei wird, reicht eben nur hin, die benachbarten noch einige Zeit vor dem Erstarren zu schützen.

Unter verschiedenen Umständen, namentlich aber wenn die erkaltende Flüssigkeit vollkommen ruhig steht, kommt es vor, daß sie weit unter die normale Erstarrungstemperatur erkaltet, ohne fest zu werden. Wird dann aber durch irgend einen Anstoß das Erstarren eingeleitet, so findet es auf einmal massenhaft statt und dabei steigt die Temperatur bis zum normalen Erstarrungspunkt infolge der durch die Erstarrung frei gewordenen Wärme. — So hat Fahrenheit bereits im Jahre 1714 die Beobachtung gemacht, daß ganz ruhig stehendes Wasser oft bis auf 10° unter Null erkaltet, ohne fest zu werden, daß aber alsdann bei dem geringsten Anstoß eine massenhafte Eisbildung stattfindet, wobei dann das Thermometer wieder auf 0° steigt.

Die Verzögerung des Erstarrens bei einer namhaften Erkaltung unter 0° findet viel leichter statt, wenn die Oberfläche des Wassers dem Druck der atmosphärischen Luft entzogen ist, wenn sich also über der Wasseroberfläche ein luftleerer Raum befindet. Man hat diesen Umstand zur Konstruktion des Apparates Fig. 532 benutzt, mit Hülfe dessen man das Freiwerden der Wärme beim Erstarren des Wassers jederzeit leicht zeigen kann. Das Gefäß eines Quecksilber-Thermometers befindet sich in der Mitte eines andern zum Teil mit Wasser gefüllten Gefäßes. Vor dem Zuschmelzen endigte dieses Gefäß bei *a* mit einem feinen offenen Röhrchen, durch welches es vollständig mit Wasser gefüllt wurde. Durch Kochen wurde ein Teil des Wassers und mit ihm alle im Gefäß noch etwa enthaltene Luft entfernt, so daß nach dem Zuschmelzen bei *a* sich über dem Wasser im Gefäß ein luftleerer Raum befindet.

Fig. 532.



Das Gefäß des Apparates Fig. 532 wird nun zunächst in Schnee gesteckt bis das Thermometer auf 0° gefallen ist; alsdann taucht man es in eine Kältemischung oder noch besser in eine durch eine Kältemischung auf — 6 bis — 8° erkaltete, wasserhelle, konzentrierte Kochsalzlösung. Allmählich sinkt das Thermometer um einige Grade und steigt dann plötzlich wieder auf 0°, sobald die massenhafte Erstarrung des Wassers im Gefäß eintritt.

Unterschwefligsaures Natron schmilzt bei 45° C.; läßt man die geschmolzene Masse ruhig stehen, so sinkt ihre Temperatur allmählich auf die der Umgebung, ohne daß sie fest wird; wird aber durch Erschütterung oder noch sicherer durch Einwerfen von Stückchen krystallisierten unterschwefligsauren Natrons das verzögerte Erstarren eingeleitet, so steigt augenblicklich ihre Temperatur um 18 bis 20°. Ähnliche Beobachtungen kann man mit einer bei höherer Temperatur gesättigten Lösung von Glaubersalz machen.

So oft ein flüssiger Körper mit einem festen eine feste Ver-

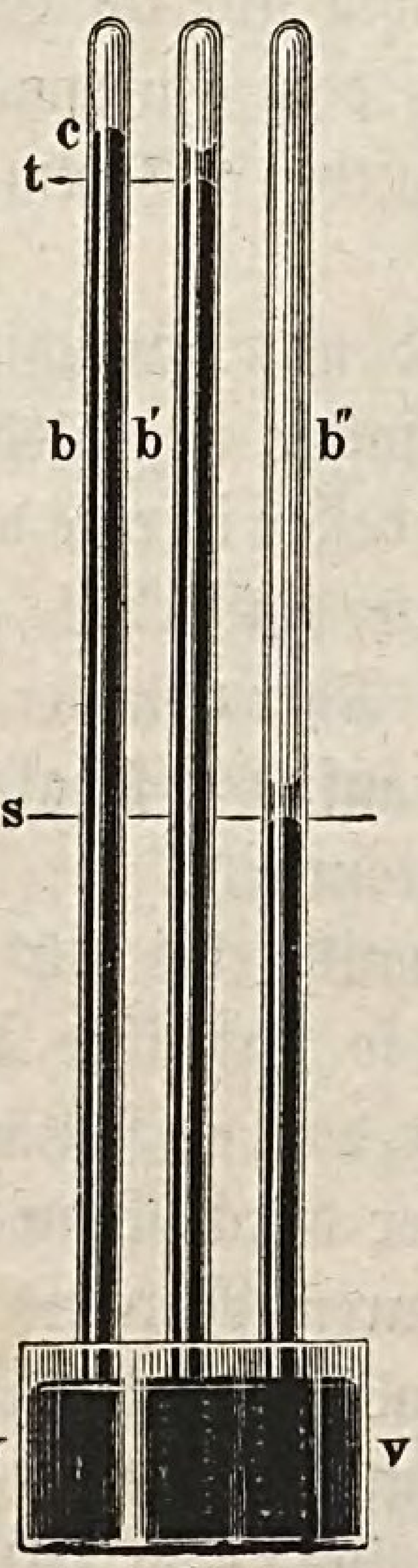
bindung eingeht, wird gleichfalls Wärme frei. So verbindet sich der gebrannte Gyps, der gebrannte Kalk mit Wasser zu festen Körpern, welche die Chemiker Hydrate nennen. Die Bildung solcher Hydrate ist meist von einer bedeutenden Wärmeentwickelung begleitet, welche zum großen Teil daher rührt, daß das Wasser, indem es seinen flüssigen Zustand verliert, seine latente Wärme abgiebt.

264 **Dampfbildung.** Wenn man an einem heißen Sommertage Wasser in einer offenen Schüssel ins Freie stellt, so verdunstet es, d. h. es wird gasförmig und verbreitet sich als Wasserdampf in der Luft. Als ein durchsichtiges Gas ist der Wasserdampf vollkommen unsichtbar. Der Schwaden, den wir über heißem Wasser beobachten, ist kein Wasserdampf mehr, sondern ein Nebel, welcher aus ganz kleinen Wasserbläschen oder Wasserkügelchen besteht, und welcher dadurch entsteht, daß die dem Gefäße entströmenden Dämpfe bei ihrer Berührung mit der kälteren Luft teilweise wieder kondensiert, d. h. zu Wasser verdichtet werden. Doch auch dieser Schwaden verschwindet alsbald wieder, indem er in der trockenen Luft verdunstet.

Man war früher der Meinung, daß die Wasserdämpfe in der Luft gleichsam aufgelöst würden, wie ein Salz in Wasser. Dalton hat aber gezeigt, daß sie sich auch im luftleeren Raume bilden und zwar noch weit rascher als im lufterfüllten, daß also ihre Bildung von der Luft ganz unabhängig ist.

Um die Bildung der Dämpfe im luftleeren Raume zu zeigen, ist das Barometer in seiner ursprünglichen Form besonders geeignet. Angenommen es seien in einem weiteren mit Quecksilber gefüllten Gefäß *vv*, Fig. 533, drei Torricelli'sche Röhren neben einander aufgestellt, dann wird in allen die Quecksilbersäule gleich hoch stehen, so lange sich ein luftleerer Raum über derselben befindet. Wenn man aber mit Hülfe einer gekrümmten Pipette etwas Schwefeläther in die eine Röhre *b''* bringt, so steigt er alsbald bis zur Torricelli'schen Leere in die Höhe, und augenblicklich sinkt auch der Gipfel der Quecksilbersäule ungefähr um die Hälfte der Barometerhöhe. Diese Depression rührt lediglich von der Spannkraft der Ätherdämpfe her, welche sich in der Torricelli'schen Leere gebildet haben.

Fig. 533.



$\frac{1}{14}$

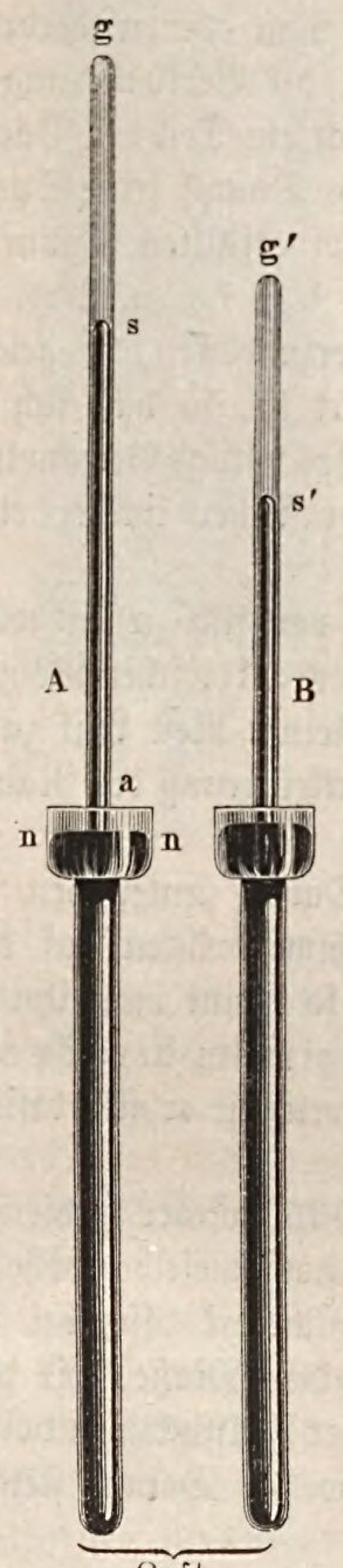
Die Größe der Depression giebt zugleich ein Maß für die Spannkraft der Dämpfe. Nehmen wir an, die durch die Ätherdämpfe deprimierte Quecksilberkuppe *s* stehe 400 mm tiefer als die Kuppe *c* im ersten Barometer, über welcher sich noch ein vollkommenes Vakuum befindet, so ist klar, daß die Ätherdämpfe auf die Quecksilberkuppe der Röhre *b''* gerade so stark drücken, wie eine Quecksilbersäule von 400 mm Höhe.

Hätte man bei der dritten Barometerröhre *b'* Wasser anstatt Äther in das Vakuum steigen lassen, so würde

man eine weit unbedeutendere Depression erhalten haben als beim Äther; bei einer Temperatur von 18° C. beträgt die Depression im Wasserbarometer nur ungefähr 15 mm; es folgt daraus, daß die Spannkraft des Wasserdampfes unter diesen Umständen dem Druck einer Quecksilbersäule von 15 mm das Gleichgewicht hält.

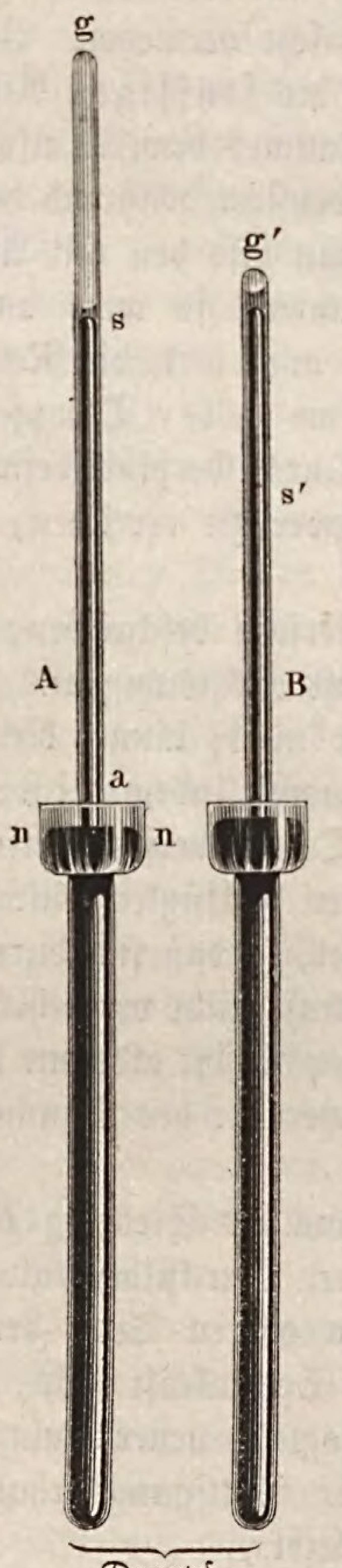
Maximum der Spannkräfte der Dämpfe. Bringt man in 265
einen luftleeren Raum so viel Flüssigkeit, daß nach erfolgter Dampfbildung davon noch übrig bleibt, so erhält man Dampf, der sich wesentlich von den Gasen unterscheidet und zwar dadurch, daß er sich weder nach dem Mariotte'schen noch nach dem Gay-Lussac-schen Gesetze richtet.

Fig. 534.



Luft.

Fig. 535.



Dampf.

Um dies richtig zu verstehen, kommen wir auf den S. 111 beschriebenen Versuch zurück. Befindet sich in der Barometerröhre ag Fig. 534, über dem Gipfel der Quecksilbersäule Luft, so wird, wenn man das Rohr tiefer in das Gefäß hinabdrückt, wie es in Fig. 534 bei B dargestellt ist, dadurch die Luft auf einen kleineren Raum $s'g'$ zusammengepreßt, zugleich wächst aber auch ihre Spannkraft so, daß mit dem Niederdrücken der Röhre auch eine Senkung des Gipfels der Quecksilbersäule von der Höhe s bis zur Höhe s' verbunden ist.

Um denselben Versuch mit Ätherdampf statt mit Luft zu wiederholen, füllt man die Torricelli'sche Röhre sehr sorgfältig mit Quecksilber, so daß alle Luft möglichst entfernt ist, was man am vollständigsten durch Auskochen oder durch die Luftpumpe erreichen kann. Ist die Röhre bis auf ungefähr 1 cm mit Quecksilber gefüllt, so gießt

man diesen Raum noch mit ausgekochtem, luftfreiem Äther voll, kehrt die Röhre auf die bekannte Weise um und taucht ihr unteres Ende in das Quecksilbergefäß. Der Äther steigt in die Höhe, ein Teil desselben verwandelt sich in Dampf, welcher die bereits im vorigen Paragraphen betrachtete Depression der Quecksilbersäule bewirkt, während noch ein Teil des Äthers in flüssigem Zustande auf dem Quecksilber schwimmend zurückbleibt.

Wenn man nun die Röhre *ag*, Fig. 535 (a. v. S.) tiefer in das Gefäß hinabdrückt, so daß sie aus der Stellung *A*, Fig. 535, in die Stellung bei *B* kommt, so behält doch der Gipfel der Quecksilbersäule seine Höhe unverändert bei, wie auch das Volum des Dampfraumes *s'g'* verkleinert sein mag.

Durch Verkleinerung des mit Ätherdampf gefüllten Raumes wird also die Spannkraft dieses Dampfes nicht vermehrt. Je mehr man aber niederdrückt, desto mehr nimmt die Menge des flüssigen Äthers zu, die Verkleinerung des mit Ätherdämpfen erfüllten Raumes bewirkt also, daß sich ein Teil der Dämpfe wieder zu flüssigem Äther kondensiert, während der übrige Dampf seine Spannkraft nicht ändert. Wenn man also den mit Ätherdampf gefüllten Raum auf $1/2$, $1/3$, $1/4$ u. s. w. komprimiert, so wird auch $1/2$, $2/3$, $3/4$ u. s. w. des Dampfes kondensiert. Fährt man fort, die Röhre niederzudrücken, so gelangt man bald zu einem Punkte, wo aller Dampf verdichtet ist, so daß sich nur noch flüssiger Äther über der Quecksilbersäule befindet; dieses völlige Verschwinden der Dampfblase ist jedoch schwer zu erreichen, weil der Äther immer etwas absorbierte Luft enthält.

Wir haben eben den Versuch beschrieben, wie er vor sich gehen würde, wenn es möglich wäre, die Luft vollständig aus der Torricelli'schen Röhre zu entfernen. Das gelingt aber nicht; immer bleibt ein kleiner Rest Luft zurück, welcher den Versuch ungenau macht, indem bei starker Verkleinerung des Raumes *sg* doch eine Depression der Quecksilbersäule erfolgt.

Wenn sich der aus einer Flüssigkeit entwickelte Dampf unter den eben betrachteten Umständen befindet, so daß sich durch Zusammendrücken auf einen kleineren Raum seine Spannkraft nicht vermehren läßt, so nennt man ihn gesättigt. Der gesättigte Dampf besitzt alsdann das Maximum der Spannkraft, deren er bei der Temperatur des Raumes, in welchem er sich befindet, überhaupt fähig ist.

Wenn man die Röhre aus der Stellung *B*, Fig. 535, wieder in die Höhe zieht, so behält der Gipfel der Quecksilbersäule immer noch dieselbe Höhe, die Spannkraft des Dampfes im oberen Teile der Röhre ändert also bei Vergrößerung des Raumes seine Spannkraft nicht, weil in dem Maße, wie dieser Raum vergrößert wird, sich sogleich neuer Dampf aus der Flüssigkeit entwickelt, so daß stets der Zustand der Sättigung erhalten, also der Dampf stets im Maximum der Spannkraft bleibt.

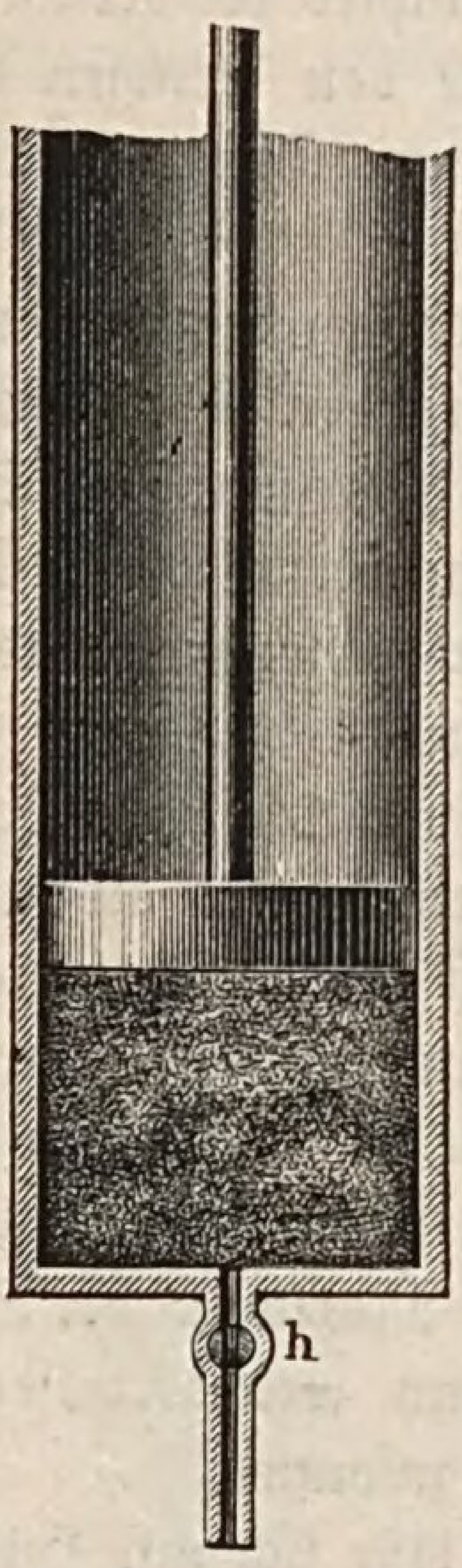
Wenn aber ein Raum eben mit gesättigtem Dampfe erfüllt ist, ohne daß noch Flüssigkeit vorhanden ist, welche neuen Dampf liefern kann, so wird bei einer Vergrößerung des Raumes der vorhandene Dampf sich ausdehnen und nun ist er nicht mehr gesättigt; er ist alsdann nicht mehr im Maximum der

Spannkraft und verhält sich nun auch ganz wie ein Gas. Die Spannkraft eines nicht gesättigten Dampfes läßt sich durch Kompression erhöhen, bis er wieder gesättigt und das Maximum der Spannkraft wieder erreicht ist.

Ein Beispiel mag dies näher erläutern.

Ein hohler Cylinder von 1 qdm Querschnitt sei durch ein Rohr, Fig. 536, mit einem Dampfkessel in Verbindung, dessen Wasser auf 100° erwärmt ist, während der Cylinder selbst sich in einer auf 100° erwärmten Umgebung befindet. Wird nun ein Kolben, welcher ursprünglich auf dem Boden des Cylinders aufsaß, 1 dm hoch in die Höhe gezogen, so wird der unter dem Kolben frei gewordene Raum von 1 cdm Inhalt sich mit gesättigtem Wasserdampf von 100° und 1 Atmosphäre Spannkraft füllen, und zwar beträgt das Gewicht des in den Cylinder übergetretenen Wasserdampfes gerade 0,6 g.

Fig. 536.



Nun werde durch die Schließung des Hahnes *h* die Kommunikation des Cylinders mit dem Dampfkessel abgesperrt und der Kolben noch weiter in die Höhe gezogen, so werden die 0,6 g Wasserdampf auch den vergrößerten Raum vollständig ausfüllen; aber nun ist der Wasserdampf nicht mehr gesättigt. Hätte man z. B. den Kolben bis zu einer Höhe von 4 dm über den Boden aufgezogen, so würden die 0,6 g Wasserdampf sich in dem Raum von 4 cdm verbreiten, jedes Kubikdecimeter würde also nur 0,15 g Wasserdampf enthalten, dessen Spannkraft nur noch $^1/_4$ Atmosphäre ist.

Wird der Kolben wieder niedergedrückt, so befolgt der nicht mehr gesättigte Dampf das Mariotte'sche Gesetz, er wird dichter, während seine Spannkraft zunimmt, bis der Kolben wieder die zuerst besprochene Stellung einnimmt und das Volumen des Cylinders unter ihm auf 1 cdm reduziert ist. Jetzt ist der Dampf wieder gesättigt, und durch ferneres Niederdrücken des Kolbens kann seine Spannkraft nicht weiter vermehrt werden. Wird z. B. der Kolben so weit niedergedrückt, daß er sich noch $^1/_2$ dm über dem Boden befindet, so werden in dem auf $^1/_2$ cdm verkleinerten Raum nur noch 0,3 g Wasserdampf von 1 Atmosphäre Spannkraft enthalten sein, während 0,3 g Wasserdampf wieder zu flüssigem Wasser kondensiert wurden.

Wir haben oben angenommen, daß die Temperatur des Wassers im Kessel 100° betrage und daß auch der Cylinder und seine Umgebung auf 100° erwärmt sei; bei einer höheren Temperatur würde jedes Kubikdecimeter mehr, bei einer tieferen würde es weniger als 0,6 g Wasserdampf aufnehmen können.

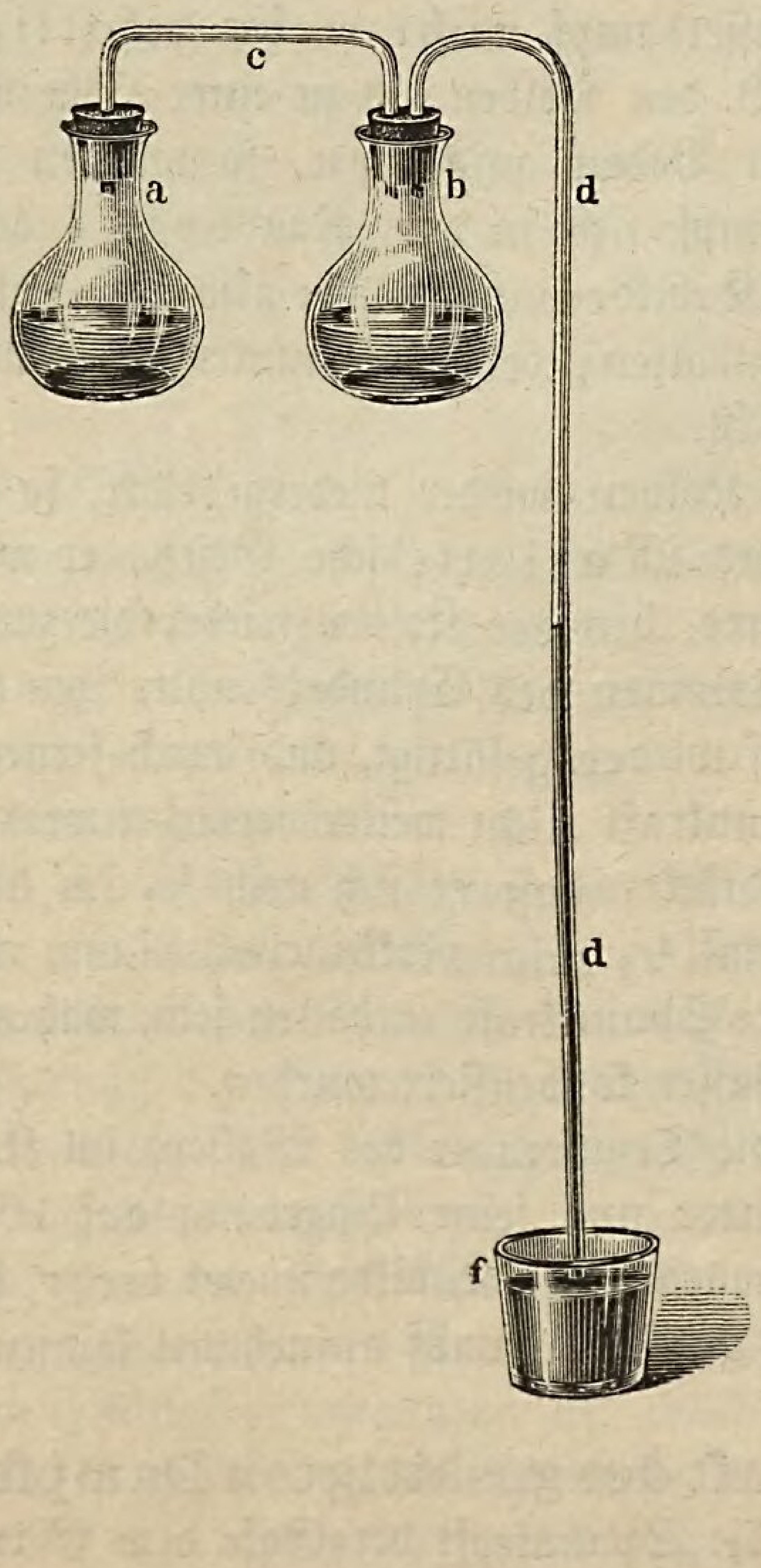
Abhängigkeit der Spannkraft des gesättigten Dampfes von der Temperatur. Während die Spannkraft der Gase dem Gay= 266

Lussac'schen Gesetze zufolge ihrer absoluten Temperatur proportional ist, wächst die der gesättigten Dämpfe in einem viel höheren Maße. Hiervon kann man sich schon durch das Dampfbarometer überzeugen, wie wir es in §. 264 kennen lernten. In einem Ätherdampfbarometer z. B. beträgt die Depression der Quecksilbersäule bei einer Temperatur von 0° C. oder 273° absoluter Temperatur nur 182 mm, bei einer Temperatur von 30° C. oder 303° absoluter Temperatur beträgt sie schon 637 mm.

Während die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes bei der mittleren Temperatur der Atmosphäre nur einer Quecksilbersäule von wenigen Millimetern das Gleichgewicht halten kann, ist sie bei höheren Temperaturen im Stande, die stärksten Dampfkessel zu zertrümmern.

Das Gesetz, nach welchem die Spannkraft des gesättigten Dampfes wächst, wenn die Temperatur steigt, soll in den folgenden Paragraphen näher besprochen werden; hier wollen wir nur noch untersuchen, welches das Maximum der Spannkraft des Dampfes in einem Raume sein wird, welcher an verschiedenen Stellen ungleich erwärmt ist. Nach den Bedingungen des Gleichgewichts gasförmiger Körper muß an allen Stellen dieses Raumes der Dampf gleiche Spannkraft haben, und da an den kälteren Stellen die Spannkraft des Dampfes nicht so groß sein kann als an den wärmeren, so ist klar, daß im ganzen Raume die Spannkraft der Dämpfe dieselbe sein muß wie an der kältesten Stelle, daß also an den wärmeren Stellen der Dampf nicht das Maximum der Spannkraft erreichen kann, welches dieser höheren Temperatur zukommt.

Fig. 537.



Dieser Satz läßt sich mit Hülfe des Apparates Fig. 537 anschaulich machen. Zwei Glaskölbchen *a* und *b*, welche beide etwas Äther enthalten, sind durch die Röhre *c* verbunden; durch den Kork, welcher *b* verschließt, geht eine zweite abwärts gebogene Röhre *d*. Wenn man durch Eintauchen der beiden Kölbchen in heißes Wasser den Äther in *a* und *b* zum Kochen bringt, so entweichen die Dämpfe durch die Röhre *d* und nehmen die Luft aus dem Apparate mit fort. Nun taucht man das untere Ende der Röhre *d* in ein Gefäß mit Quecksilber und entfernt die Wärmequellen, welche den Äther ins Kochen gebracht hatten. Alsbald erkalten *a* und *b* bis auf die Temperatur der umgebenden Luft

die Spannkraft der Dämpfe im Apparate nimmt dabei bis zu einer bestimmten Grenze ab, und das Quecksilber steigt demnach in der Röhre *d* bis zu einer bestimmten Höhe, welche von der Temperatur der umgebenden Luft abhängt. Taucht man nun das eine Kölbchen in Schnee oder in eine Kältemischung, so steigt das Quecksilber alsbald eben so hoch, als ob beide Kölbchen dieselbe Erkaltung erfahren hätten.

In dem erkalteten Kölbchen findet zunächst eine Kondensation von Ätherdämpfen statt; in dem Maße aber, wie hier die Dämpfe verdichtet werden, strömen Ätherdämpfe fortwährend aus dem wärmeren Kölbchen in das kältere über. Auf dieses Princip gründet sich die Anwendung des **Kondensators** bei Dampfmaschinen, welchen wir später werden kennen lernen.

Spannkraft der Wasserdämpfe. Um die Spannkraft des Wasserdampfes zu bestimmen, hat man verschiedenartige Apparate anzuwenden, 267

Fig. 538.

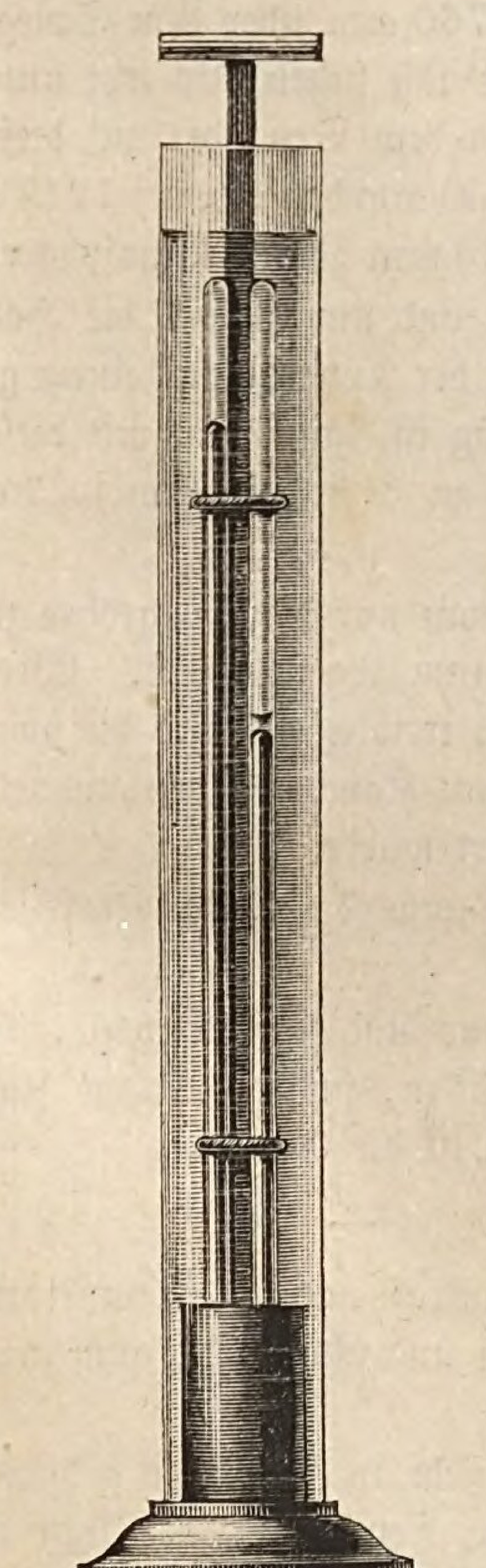
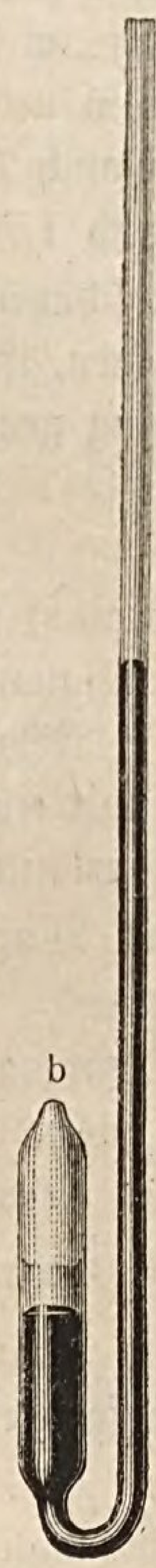


Fig. 539.



je nachdem man sie für eine Temperatur zwischen 0° und 100° oder über 100° ermitteln will.

Zwischen 0° und 100° wendet man den in Fig. 538 abgebildeten Apparat an. Er besteht aus zwei Barometerröhren, welche neben einander in dasselbe Gefäß eingetaucht sind; die erste dieser Röhren bildet ein vollständiges Barometer, in der zweiten befindet sich über dem Quecksilber etwas Wasser, welches zum Teil im leeren Raume verdampft. Diese beiden Röhren werden mittels eines Eisenstabes in ein hinlänglich tiefes Glasgefäß eingesenkt. Dieses Gefäß ist ganz mit Wasser gefüllt, welches man bis zu jeder beliebigen Temperatur zwischen 0° und 100° erwärmen kann. Die Temperatur dieses Wassers, welches durch zweckmäßig angebrachte Thermometer bestimmt wird, ist zugleich die der beiden Barometer und des Wasserdampfes in dem einen. Um die Elasticität des Wasserdampfes zu erhalten, welche jedem Temperaturgrade entspricht, hat man nur zu ermitteln, um wie viel die Quecksilberkuppe im Dampfbarometer tiefer steht, als der Gipfel der Quecksilbersäule im vollständigen Barometer.

Um die Spannkraft der Dämpfe

über 100° C. zu messen, läßt sich folgendes Verfahren anwenden. An einer ziemlich langen Glasröhre, Fig. 539 (a. v. S.), ist ein weiteres Gefäß angeschmolzen, ungefähr so wie das Gefäß eines Barometers; die längere Röhre sowohl wie die kürzere sind anfänglich oben offen. Wenn man Quecksilber eingießt, so stellt es sich natürlich in beiden Röhren gleich hoch. Nun wird die zu untersuchende Flüssigkeit, z. B. Wasser, in das weitere Gefäß auf das Quecksilber gebracht, dann einige Zeit lang im Kochen erhalten und bei *b* zugeschmolzen, wenn alle Luft ausgetrieben ist. Es befindet sich über dem Quecksilber im Gefäß nur noch Wasser und Wasserdampf, welcher aber kondensiert wird, wenn der Apparat erkaltet.

Wird nun das Gefäß dieses Apparates in Öl eingetaucht, welches über 100° C. erwärmt ist, so werden sich Wasserdämpfe bilden, welche auf das Quecksilber im Gefäß drücken und die Quecksilbersäule im längeren Rohre steigen machen; aus der Höhe, bis zu welcher es steigt, kann man auf die Spannkraft der Dämpfe schließen. Ist z. B. das Öl auf 121° C. erwärmt, so steigt das Quecksilber im Rohre so hoch, daß sein Gipfel um 760 mm über dem Spiegel des Quecksilbers im Gefäß steht. Die Dämpfe im Gefäß stehen also jetzt unter dem Druck einer Quecksilbersäule von 760 mm nebst dem Druck der auf dieser Quecksilbersäule lastenden Atmosphäre, welcher auch 760 mm beträgt; bei 121° C. ist also die Spannkraft der Wasserdämpfe gleich 1520 mm oder 2 Atmosphären.

Um die Röhre vor dem Zerbrechen zu schützen und um zugleich die Höhe der gehobenen Quecksilbersäule messen zu können, ist der Apparat auf einem geteilten Brette befestigt. Wenn die Röhre lang genug ist, kann man mit dieser Vorrichtung die Spannkraft der Wasserdämpfe bis zu 3 und 4 Atmosphären messen.

Um stärkere Spannkräfte zu messen, braucht man nur die Steigröhre zuzuschmelzen, so daß in ihr ein bestimmtes Luftquantum abgesperrt ist. Wenn die Dämpfe im Gefäß das Quecksilber in die Röhre treiben, so wird die abgesperrte Luft komprimiert, man hat also hier mit einem Kompressionsmanometer zu thun, dessen Princip bereits auf S. 121 erläutert wurde.

Die nebenstehende Tabelle enthält das Maximum der Spannkraft der Wasserdämpfe für verschiedene Temperaturen.

Um die Beziehungen zwischen der Temperatur und der entsprechenden Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes auszudrücken, sind eine große Zahl empirischer Formeln aufgestellt worden; unter diesen ist die Gleichung

$$\log e = 5{,}58188 \log [1 + 0{,}002108\,(t - 100)]$$

in welcher *e* die in Atmosphären ausgedrückte Spannkraft und *t* die Temperatur nach Centesimalgraden bezeichnet, eine der einfachsten und schließt sich auch ziemlich gut den Beobachtungen an.

Die Spannkraft des Dampfes wächst, wie man sieht, in einem weit größeren Verhältnisse als die Temperatur, d. h. bei höheren Temperaturen bringt die gleiche Temperaturerhöhung eine weit größere Vermehrung der Spannkraft hervor als bei niedrigen; während eine Temperaturerhöhung von 100 bis 121°,

Grade	Spannkraft des Wasserdampfes in Millimetern	Druck auf 1 qcm in Kilogrammen	Spannkraft in Atmosphären	Entsprechende Temperaturen	Druck auf 1 qcm in Kilogrammen
0	5	0,007	1	100	1,03
10	9	0,013	2	121	2,07
20	17	0,023	3	133,9	3,10
30	30	0,042	4	145	4,83
40	51	0,072	6	160	6,20
50	89	0,126	8	172	8,26
60	145	0,196	10	182	10,33
70	229	0,311	15	200	15,49
80	352	0,478	20	215	20,66
90	525	0,714	25	226	25,82
100	760	1,033	30	236	30,99

also um 21°, die Spannkraft des Wasserdampfes um 1 Atmosphäre vermehrt, wächst sie bei einer Temperaturerhöhung von 226 bis 236°, also bei einer Temperaturerhöhung von nur 10 Graden, schon um 5 Atmosphären; zwischen 226 und 236° reicht also ungefähr eine Temperaturerhöhung von 2° schon hin, um die Spannkraft des Wasserdampfes um 1 Atmosphäre zu steigern.

Wie mit steigender Temperatur die Spannkraft der Dämpfe wächst, läßt sich auch mit Hülfe eines kleinen Dampfkessels, des papinianischen Topfes, Fig. 540 (a. f. S.), zeigen. In dem fest aufgeschraubten Deckel befinden sich drei Öffnungen; auf der einen ist ein Sicherheitsventil von der bereits auf Seite 122 betrachteten Einrichtung angebracht; in die zweite Öffnung ist ein in den Kessel hineinragendes Röhrchen *a* von Eisenblech aufgeschraubt, welches zum Teil mit Quecksilber gefüllt wird. Auf der dritten Öffnung endlich sitzt ein kurzes, durch einen Hahn verschließbares Rohr, auf welches man verschiedene Ausströmungsöffnungen aufschrauben kann.

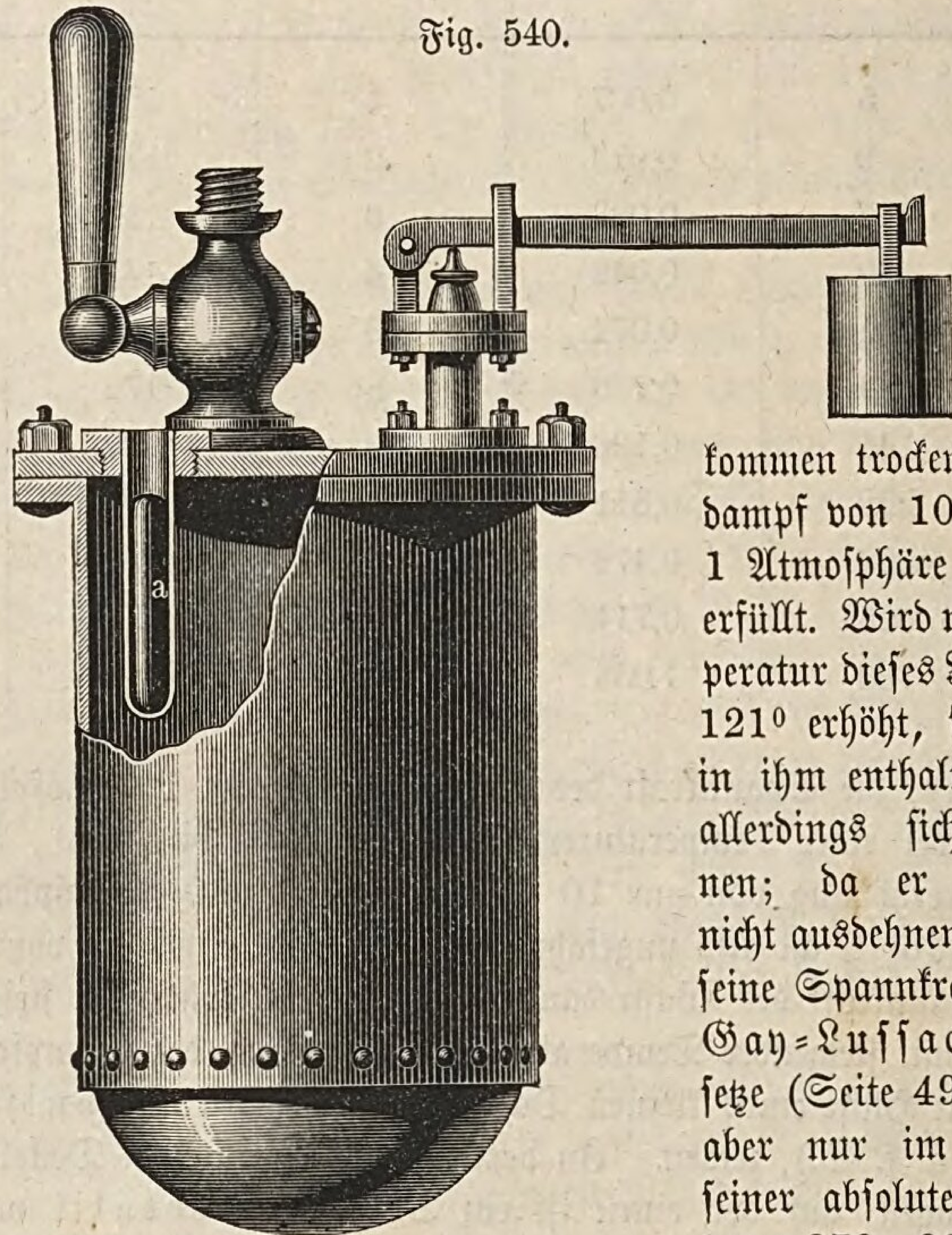
Wird der bis zu $^2/_3$ seiner Höhe mit Wasser gefüllte Kessel genügend erhitzt, so kommt das Wasser nach einiger Zeit ins Kochen, wenn der Hahn geöffnet ist; ein in das Quecksilber der Rohres *a* eingetauchtes Thermometer, zeigt konstant die Temperatur des Siedepunktes. Sobald man aber den Hahn schließt, also das Abziehen der Dämpfe hindert, steigt sogleich das Thermometer, und die Spannkraft der Dämpfe im Kessel wächst, bis sie endlich groß genug ist um das Sicherheitsventil zu heben und hier einen Ausweg zu erzwingen.

Gesetzt, der Querschnitt der Ventilfläche betrage 1 qcm und an den Hebel sei ein Gewicht so angehängt, daß durch dieses das Ventil mit 1 kg belastet ist, so beträgt, da auch die Luft mit 1 kg auf die Ventilfläche drückt, der Gesamtdruck

auf letztere 2 kg oder 2 Atmosphären; der Dampf wird also zum Ventil herausblasen, wenn seine Spannkraft zwei Atmosphären beträgt, und dies ist der Fall, wenn das Thermometer 121° C. zeigt.

Die Zunahme der Spannkraft bei wachsender Temperatur hat zwei Ursachen. Denken wir uns irgend einen abgesperrten Raum mit gesättigtem, jedoch voll-

Fig. 540.



kommen trockenem Wasserdampf von 100° oder von 1 Atmosphäre Spannkraft erfüllt. Wird nun die Temperatur dieses Raumes auf 121° erhöht, so sucht der in ihm enthaltene Dampf allerdings sich auszudehnen; da er jedoch sich nicht ausdehnen kann, wird seine Spannkraft nach dem Gay-Lussac'schen Gesetze (Seite 499) wachsen, aber nur im Verhältnis seiner absoluten Temperaturen 373 : 394, und wird daher 1,06 Atmosphären betragen. Der Dampf ist nun nicht mehr gesättigt, es ist überhitzter Dampf, welcher sich ganz ebenso verhält wie ein Gas. Wenn sich aber noch Wasser in diesem Raume befindet, so wird sich infolge der Temperaturerhöhung eine neue Quantität Dampf bilden, bis die Spannkraft desselben 2 Atmosphären beträgt. Die Zunahme der Spannkraft des gesättigten Dampfes rührt also vorzugsweise daher, daß der Dampf dichter wird und infolge seiner größeren Dichtigkeit einen größeren Druck ausübt.

1 Kubikdecimeter (Liter) Wasser liefert ungefähr

1646	Liter	gesättigten	Dampf	von	100° C.	und	1	Atm.	Spannkraft
851	"	"	"	"	121	"	2	"	"
436	"	"	"	"	145	"	4	"	"
183	"	"	"	"	182	"	10	"	"

268 **Spannkraft anderer Dämpfe.** Wie die Spannkraft der gesättigten Dämpfe anderer Flüssigkeiten, z. B. des Weingeistes, des Äthers, des

Schwefelkohlenstoffs u. s. w., von der Temperatur abhängen, läßt sich gleichfalls mit Hülfe barometerartiger Vorrichtungen bestimmen, wie wir sie im vorigen Paragraphen kennen lernten.

Unter dem Druck der Atmosphäre ist der Siedepunkt irgend einer Flüssigkeit die Temperatur, bei der die Spannkraft ihrer gesättigten Dämpfe gleich ist dem Druck der Atmosphäre. Für den Siedepunkt haben also die Dämpfe aller Flüssigkeiten gleiche Spannkraft. Dalton glaubte, daß in gleichem Temperaturabstande von ihrem Siedepunkte die Spannkräfte der Dämpfe aller Flüssigkeiten gleich seien. Die Erfahrung hat dieses Gesetz jedoch nicht bestätigt. Die folgende Tabelle enthält die Spannkraft der Dämpfe einiger Flüssigkeiten für die beigeschriebenen Temperaturen nach Regnault's Versuchen.

Temperatur	Alkohol	Schwefelkohlenstoff	Äther
— 20	3,3 mm	—	69,2 mm
0	12,7	127,3 mm	182,3
+ 20	44,0	298,2	434,8
50	220,3	852,7	1268,0
100	1685,0	3321,3	4920,4

Es giebt Flüssigkeiten, deren Siedepunkt unter der mittleren Lufttemperatur liegt; solche Körper können natürlich unter gewöhnlichen Umständen nicht tropfbar flüssig sein, sie sind bei der gewöhnlichen Lufttemperatur unter dem gewöhnlichen Luftdrucke nur gasförmig.

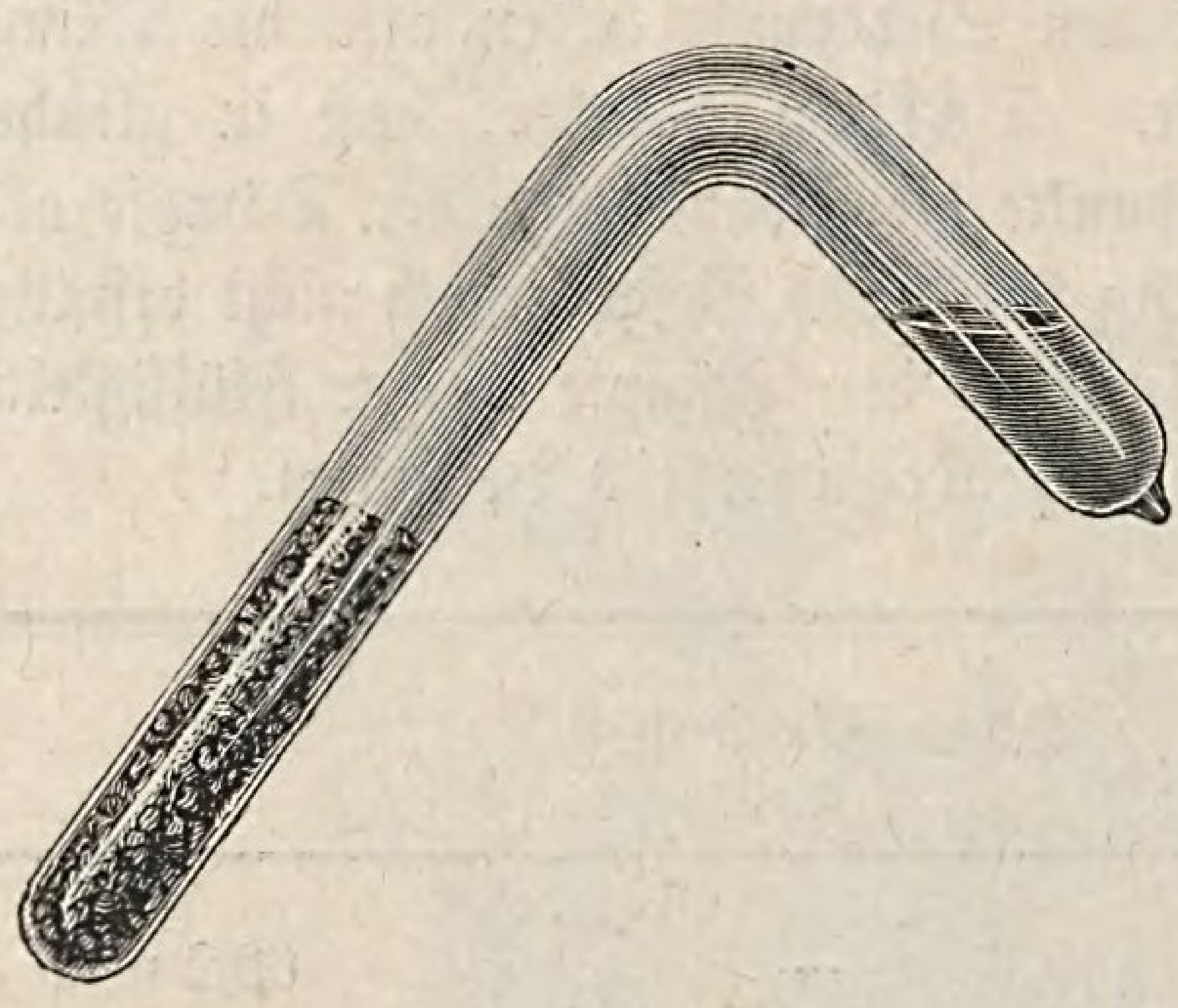
Kondensation der Gase. Der Unterschied zwischen Gasen und Dämpfen ist nur ein relativer, indem ungesättigte Dämpfe sich wie Gase verhalten. Da nun ungesättigte Dämpfe durch Druck und Abkühlung in den Zustand der Sättigung übergeführt und hierauf kondensiert werden können, so lag der Versuch nahe, auch die Gase durch großen Druck und Kälte zu verdichten. 269

Zur Verdichtung der Kohlensäure brachte Faraday (1823) in den verschlossenen Schenkel einer gebogenen und starken Glasröhre (Fig. 541 a. f. S.) Schwefelsäure und darüber, von Papier gehalten, wasserfreie Soda; der andere Schenkel wurde hierauf zugeschmolzen, in eine Kältemischung gesetzt, und durch Schütteln die Soda mit der Schwefelsäure in Berührung gebracht. Die entwickelte Kohlensäure verdichtete sich alsdann in dem abgekühlten Schenkel unter einem Drucke von etwa 30 Atmosphären.

Um größere Mengen flüssiger Kohlensäure zu erhalten bedient man sich einer von Natterer (1844) konstruierten Druckpumpe, mittels welcher die gasförmige Säure in eine durch Eis abgekühlte schmiedeiserne Flasche gepreßt wird, in der sie sich verdichtet. Beim Öffnen der Flasche strömt die Kohlensäure als milchichter Strahl aus, gefriert, und legt sich in dem Auffanggefäße in schnee-

ähnlichen Flocken an. Infolge der raschen Verdunstung und Ausdehnung eines Teils der Säure wird nämlich, wie später erklärt werden wird, so viel Wärme gebunden, daß der andere Teil erstarrt; dabei sinkt die Temperatur auf — 70° C.; die Temperatur sinkt sogar auf — 140° C., wenn man feste Kohlensäure unter den Recipienten der Luftpumpe bringt und die verdampfende Säure durch rasches Auspumpen entfernt. Nimmt man ein wenig fester Kohlensäure zwischen die Finger, so hat man wegen der großen Kälte dieselbe Empfindung, wie wenn die Haut verbrannt würde.

Fig. 541.



Außer Kohlensäure gelang es Faraday, die meisten Gase, wie Ammoniak, Chlor, Schwefelwasserstoff, schweflige Säure, Stickoxydulgas, in Flüssigkeiten zu verwandeln; dagegen waren alle Versuche, auch den Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, das Stickoxyd, das Sumpfgas und Kohlenoxyd zu verdichten, ohne Erfolg, selbst als Natterer diese Gase einem ungeheueren Drucke bis zu 3600 Atmosphären unterwarf; diese Gase wurden deshalb auch permanente Gase benannt, während man die übrigen als coercible bezeichnete.

Einen bedeutenden Fortschritt macht die Lehre von der Kondensation der Gase durch eine Untersuchung, welche Andrews in Belfast in den Jahren 1865 bis 1870 ausführte. Er wies nach, daß es für jeden gas- oder dampfförmigen Körper eine Temperaturgrenze giebt, nach deren Überschreitung der Körper bei noch so hohem Drucke nicht verflüssigt werden kann. Diese Temperaturgrenze, welche Andrews den kritischen Punkt nennt, liegt für Schwefelätherdampf bei etwa 200° C., für Kohlensäure bei 31° C.; der Schwefelätherdampf und das Kohlensäuregas können also nur bei Temperaturen, welche unter 200° beziehungsweise 31° C. liegen, durch Druck zu Flüssigkeiten verdichtet werden; bei Temperaturen, welche darüber liegen, können diese Körper nur im Gaszustande vorkommen.

Durch die Untersuchung von Andrews war die Erfolglosigkeit der Verdichtungsversuche der sogenannten permanenten Gase klar gelegt: der kritische Punkt derselben liegt so tief, daß er durch die bei diesen Versuchen angewandte Kälte nicht erreicht wurde. Eine Aussicht auf Erfolg konnte man daher nur dann haben, wenn man nicht, wie Natterer, das Hauptgewicht auf die starke Kompression legte, sondern eine bisher noch nicht erreichte Kälte erzielte, durch welche die Gase unter ihren kritischen Punkt abgekühlt und dann durch den starken Druck verdichtet werden.

Nach diesem Grundsatz sind Raoul Pictet in Genf und Cailletet in Chatillon bei Paris verfahren, und nach jahrelanger Beschäftigung mit dem Gegenstande ist es ihnen am Ende des Jahres 1877 gelungen, die

bisher für permanent gehaltenen Gase zu verflüssigen. Cailletet stellte seine Versuche nur im kleinen Maßstabe an und erhielt die verflüssigten Gase in Form eines schwachen Nebels. Pictet dagegen konstruierte einen großen Apparat, der durch eine 15-pferdige Dampfmaschine in Gang gesetzt wurde, und komprimierte die Gase in Glasröhren, welche in gefrorener, bis auf — 140° C. abgekühlter Kohlensäure steckten. Bei einem Drucke von etwa 500 Atmosphären wurde der Sauerstoff flüssig und strömte nach Öffnung der Röhre mit größter Gewalt aus; ein in den Strahl gehaltenes glühendes Stück Holz verbrannte mit der furchtbarsten Heftigkeit. Der Wasserstoff wurde in der Röhre bis auf 650 Atmosphären zusammengepreßt und beim Öffnen des Hahns strömte ein dunkelblauer Strahl aus, bei dessen Aufschlagen ein Geräusch hörbar wurde, wie von aufschlagenden Schrotkügelchen.

Der Dampfkessel. Wo es sich darum handelt, Wasserdampf in **270**
größerer Menge zu erzeugen, sei es zum Betriebe von Dampfmaschinen, oder zur Dampfheizung u. s. w., wendet man eigens konstruierte Dampfkessel an, deren Größe, Gestalt, Heizvorrichtung u. s. w., je nach den speciellen Zwecken, die mannigfaltigsten Verschiedenheiten zeigen. Wie übrigens auch der Dampfkessel sonst eingerichtet sein mag, so sind doch stets folgende Bestandteile durchaus notwendig:

1) Das Dampfleitungsrohr, welches den Dampf aus dem oberen Teile des Dampfkessels dem Orte zuführt, wo er zur Verwendung kommen soll.

2) Das Speiserohr, durch welches (meist mittels einer Druckpumpe) dem Kessel wieder Wasser zugeführt werden kann, um das zu ersetzen, was durch Verdampfung verbraucht wird.

3) Das Mannloch, eine durch eine aufgeschraubte Metallplatte verschlossene Öffnung, welche so groß ist, daß ein Mann durch sie in den Kessel einsteigen kann, wenn letzterer gereinigt werden soll.

4) Ein Sicherheitsventil.

5) Ein Wasserstandszeiger, d. h. irgend eine Vorrichtung, durch welche man ersehen kann, wie hoch das Wasser im Kessel steht, um danach den Wasserzufluß regulieren zu können.

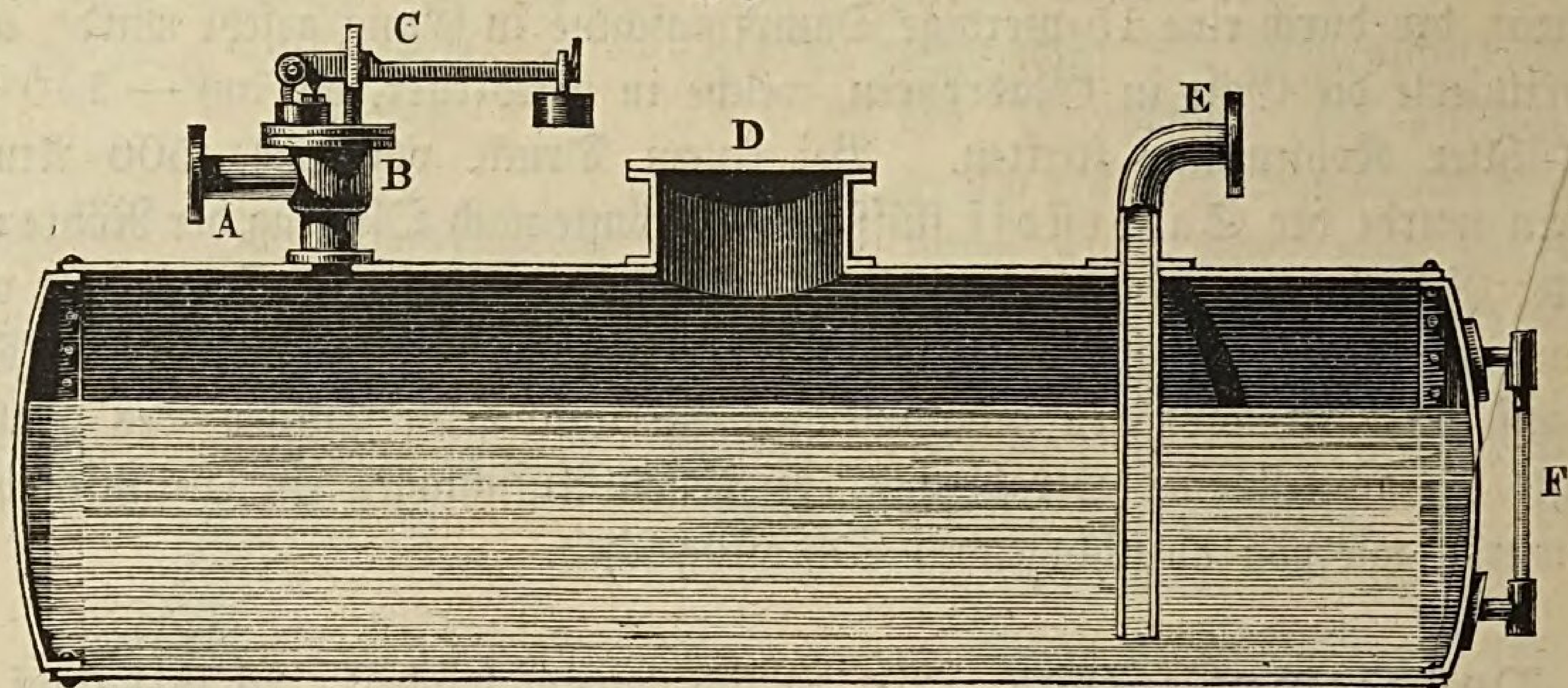
Fig. 542 (a. f. S.) stellt einen möglichst einfachen Dampfkessel mit den soeben als wesentlich bezeichneten Teilen dar. Es ist

A das Dampfrohr,
E das Speiserohr,
C das Sicherheitsventil,
D das Mannloch,
F der Wasserstandszeiger,

hier ein Glasrohr, welches durch horizontale Messingröhrchen mit dem oberen und dem unteren Teile des Dampfkessels in Verbindung steht, so daß das Wasser im Glasrohre sich stets in gleiche Höhe mit dem Wasser im Kessel stellen muß. Statt eines solchen Rohres werden auch andere Vorrichtungen zum gleichen Zwecke angewandt.

Die Kesselwände müssen natürlich um so stärker gemacht werden, je größer der Durchmesser des Kessels und je größer die Spannkraft der Dämpfe ist,

Fig. 542.

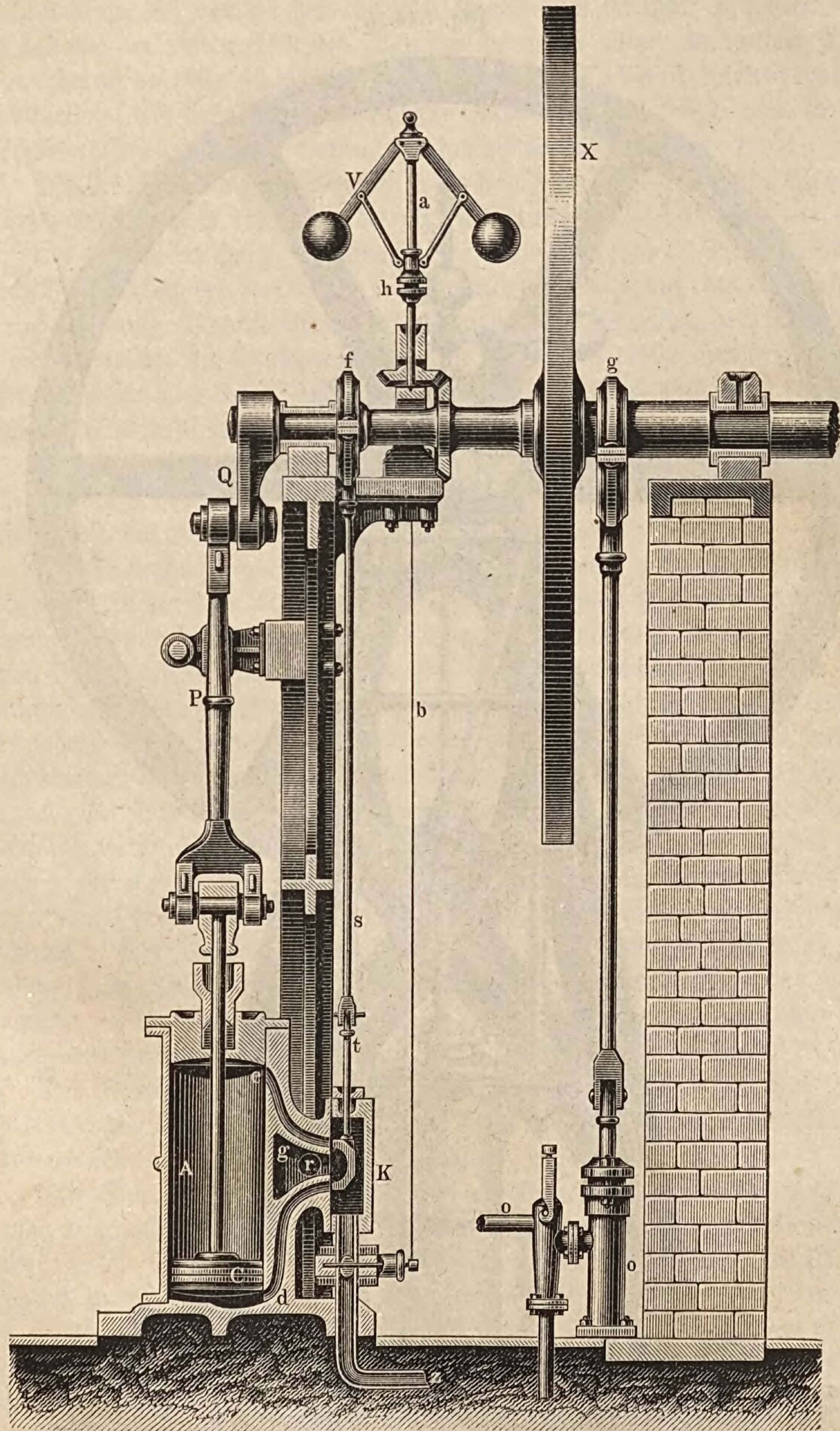


welche er einschließt. In den meisten Staaten sind, um Unglück zu verhüten, die Anlagen von Dampfkesseln an gesetzliche Bestimmungen geknüpft.

271 **Die Dampfmaschine.** Schon seit 1711 wandte man in England die Dampfkraft zur Förderung der Grubenwasser in Bergwerken an; aber abgesehen davon, daß die dazu verwandten Maschinen Savery's und Newcomen's doch nur eine sehr beschränkte Anwendbarkeit hatten, war ihr Betrieb auch sehr kostspielig. Erst James Watt gelang es im Jahre 1769, die Konstruktion der Dampfmaschine so zu vervollkommnen, daß eine allgemeine Benutzung der Dampfkraft möglich wurde.

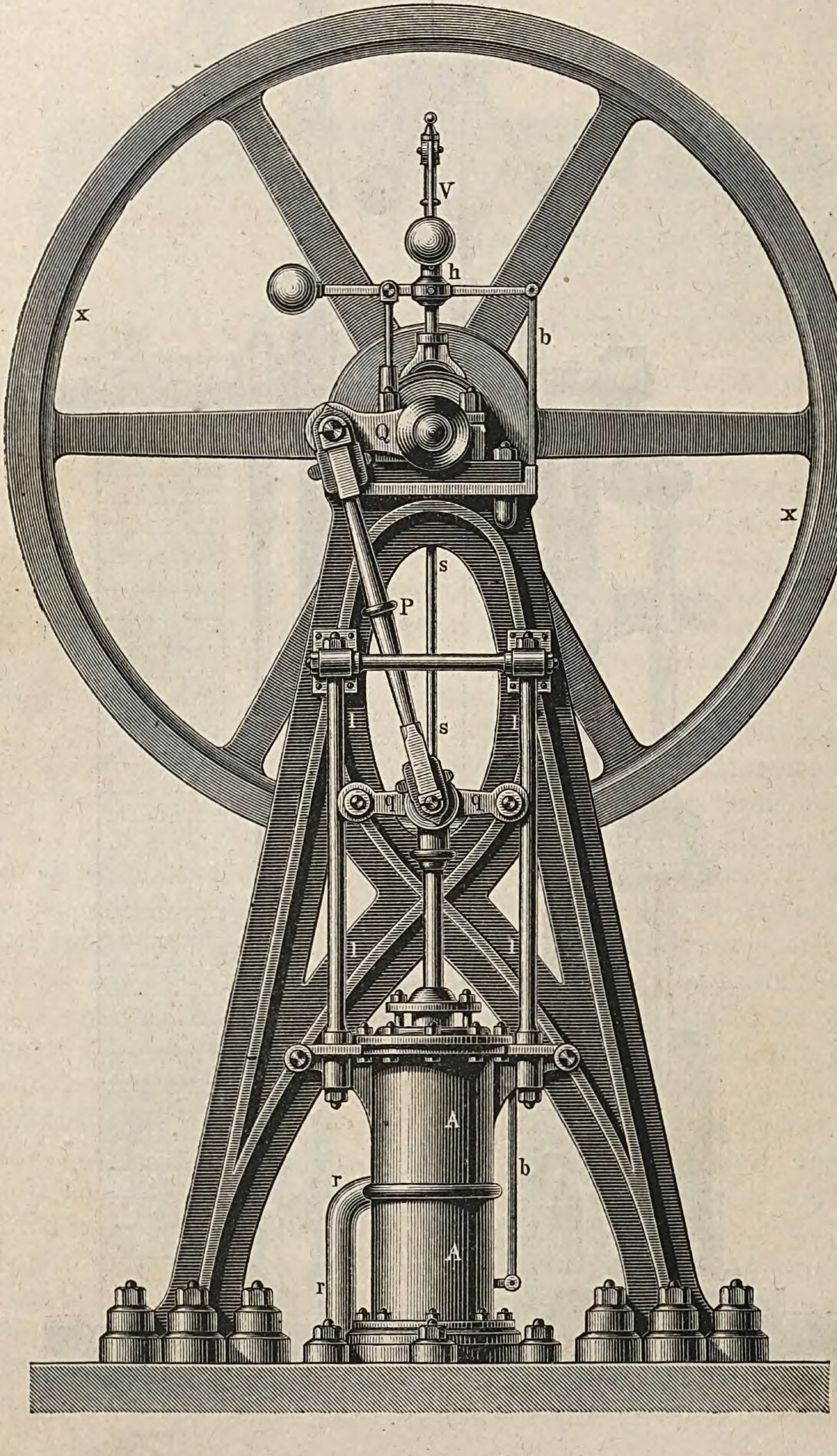
Das Princip der Dampfmaschine besteht darin, daß durch die Spannkraft des Dampfes ein Kolben in einem Cylinder in schwingende Bewegung versetzt, diese Bewegung in eine drehende umgewandelt und auf eine Welle übertragen wird. Nach der Größe der angewendeten Spannkraft zerfallen die Dampfmaschinen in Nieder-, Mittel- und Hochdruckmaschinen, je nachdem der Überdruck des Dampfes, d. i. der Druck, um welchen die Spannkraft des Dampfes den Gegendruck der Luft übersteigt, $^1/_2$, 2 bis 4, oder 5 und mehr Atmosphären beträgt. — Nach der Dampfzuleitung unterscheidet man Maschinen ohne und solche mit Expansion; bei ersteren fließt der Dampf während der ganzen Kolbenbewegung ununterbrochen zu und wirkt mit unveränderter Spannkraft; bei letzteren wird der Dampf, nachdem der Kolben einen gewissen Weg zurückgelegt hat, abgesperrt und wirkt alsdann mit abnehmender Spannkraft. — Nach dem Dampfabflusse teilt man die Dampfmaschinen ein in Maschinen ohne und solche mit Kondensation, je nachdem der Dampf nach geleisteter Arbeit in die freie Luft ausströmt, oder in einem luftverdünnten Raume, dem Kondensator, verdichtet wird. — Nach der Aufstellung zerfallen die Dampfmaschinen in feststehende und in bewegliche oder Lokomobilen; jene ruhen auf einem Fundamente, während sich diese auf einem Schiffe oder Wagen befinden. Eine besondere Art der beweglichen Dampfmaschinen sind die Lokomotiven, welche durch die Dampfkraft selbst fortbewegt werden.

Fig. 543.



Wir wollen die Dampfmaschine zunächst in ihrer einfachsten Form kennen lernen. Fig. 543 (a. v. S.) stellt eine Hochdruck=Dampfmaschine im Durch=

Fig. 544.



schnitt, Fig. 544 stellt von derselben Maschine eine vordere Ansicht dar. Durch das Rohr *z*, Fig. 543, gelangt der Dampf aus dem Dampfkessel zunächst in die Dampfkammer *K*, von welcher aus zwei Kanäle zum Cylinder *A* führen; der eine mündet am oberen Ende des Cylinders bei *e*, der andere am unteren Ende bei *d*. Durch den Verteilungsschieber, den wir alsbald näher betrachten wollen, wird bewirkt, daß der Dampf abwechselnd unten und dann wieder oben in den Cylinder einströmt und den Kolben *C* abwechselnd auf- und niedertreibt.

Die Kolbenstange bewegt sich luft- und dampfdicht durch eine Stopfbüchse, welche sich in der Mitte des oberen Cylinderdeckels befindet.

An der Kolbenstange ist zunächst die Treibstange *P* befestigt, welche durch Vermittlung der Kurbel *Q* die alternierende Bewegung des Kolbens in eine gleichförmige Rotationsbewegung verwandelt. Die Achse der Kurbel *Q* ist die Hauptachse der Maschine, welche in Bewegung gesetzt werden soll; an dieser Achse ist auch das Schwungrad *X* befestigt, welches dazu dient, kleinere Ungleichheiten im Gange der Maschine auszugleichen.

Um den geraden Gang der Kolbenstange zu sichern, ist am oberen Ende derselben der Kreuzkopf *q*, Fig. 544, angebracht, welcher durch die zu beiden Seiten stehenden eisernen Säulen *l* gerade geführt wird.

Die Bewegung des Kolbens *C* ist begreiflicherweise nicht gleichförmig, da derselbe am oberen und unteren Ende seiner Bahn einen Augenblick zur Ruhe kommt, um dann die Richtung seiner Bewegung umzukehren. Seine Geschwindigkeit ist am größten, wenn er eben die Mitte des Cylinders durchläuft; sie nimmt um so mehr ab, je mehr er sich dem oberen oder unteren Ende des Cylinders nähert. Betrachten wir nun die Bewegung der Kurbel, so finden wir, daß bei gleichförmiger Umdrehungsgeschwindigkeit ihre Bewegung im vertikalen Sinne dennoch sehr veränderlich ist. Der Kurbelarm steht wagerecht, wenn der Kolben *C* sich in der Mitte des Cylinders befindet, in diesem Moment hat die Bewegung der Kurbel eine vertikale Richtung; wenn aber der Kolben *C* seine höchste oder seine tiefste Stellung hat, so bewegt sich die Kurbel in horizontaler Richtung. Der vertikale Anteil der Kurbelbewegung ist der Bewegung des Kolbens ganz gleich; in dem Maße, in welchem die Kurbelbewegung mehr horizontal wird, nimmt auch die Geschwindigkeit des Kolbens ab, ohne daß dadurch eine Verminderung in der Umdrehungsgeschwindigkeit der Kurbel erfolgte.

Der Durchmesser der Kurbelbahn ist begreiflicherweise der Höhe des Cylinders, die Dicke des Kolbens abgerechnet, gleich; die Länge des Kurbelarmes ist demnach der halben Hubhöhe des Kolbens gleich.

Das Schwungrad *X* dient dazu, die Bewegung der Maschine gleichförmig zu erhalten. Wenn auch der Druck des Dampfes auf den Kolben ganz unveränderlich wäre, so würde er doch nicht bei allen Stellungen der Kurbel gleichviel zu deren Umdrehung beitragen können. In der That kann man sich den Druck, welcher durch die Treibstange *P* auf die Kurbel wirkt, in zwei zu einander rechtwinklige Kräfte zerlegt denken; die eine, welche in der Richtung der Kurbel wirkt, trägt nichts zur Umdrehung bei, sondern wird durch den Gegendruck der Achse aufgehoben, während die andere, welche tangential zur Kurbel-

bahn gerichtet ist, die Umdrehung der Kurbel bewirkt. Die Größe dieser beiden Kräfte ändert sich aber in jedem Momente. Wenn der Kurbelarm vertikal steht, wirkt jeder Druck, welcher vom Kolben ausgeht, einzig und allein als Druck auf die Kurbelachse. Wenn in dieser Stellung die Maschine stillstände, so würde der größte Druck auf den Kolben sie nicht in Bewegung setzen können; diese Stellung heißt deshalb auch der tote Punkt der Maschine. Daß aber die letztere, wenn sie sich in einem toten Punkt befindet, nicht stillstehen bleibt, rührt einzig und allein daher, daß die einzelnen Maschinenteile vermöge ihrer erlangten lebendigen Kraft ihre Bewegung fortsetzen, gerade so wie ein Pendel, wenn es in der Gleichgewichtslage ankommt, doch vermöge seiner lebendigen Kraft die Bewegung fortsetzt.

Überhaupt wird der Lauf der Maschine eine Beschleunigung erfahren, wenn der Kolben sich in der Nähe der Mitte des Cylinders bewegt; dagegen tritt eine Verzögerung im Laufe der Maschine ein, wenn sich der Kolben nahe am oberen oder unteren Ende des Cylinders befindet; diese Ungleichförmigkeiten werden aber durch das Schwungrad um so mehr ausgeglichen, je größer die Masse und der Halbmesser desselben ist.

Betrachten wir nun die Steuerung der Maschine, d. h. die Vorrichtung, durch welche bewirkt wird, daß der aus dem Kessel kommende Dampf, abwechselnd unten und dann wieder oben in den Cylinder eintritt. In der dem Cylinder zugekehrten Wand der Dampfkammer K befinden sich drei Öffnungen von denen die eine mit dem oberen, die andere mit dem unteren Teile des Cylinders in Verbindung steht, während die mittlere zu einer Höhlung g, Fig. 543, führt, aus welcher der verbrauchte Dampf durch das Rohr r in die freie Luft gelangt. Vor diesen Öffnungen bewegt sich nun der Verteilungsschieber, dessen Einrichtung aus Fig. 545 näher zu ersehen ist. In der Stellung, wie sie

Fig. 545.

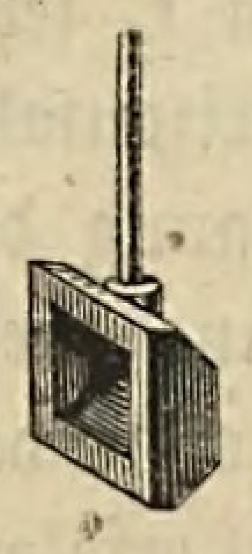


Fig. 543 zeigt, sind beide Kanäle durch den Schieber verschlossen, es strömt gar kein Dampf in den Cylinder, denn es ist dies ja der Moment, in welchem der Kolben gerade seine tiefste Stellung hat, in welchem die Maschine im toten Punkte angelangt ist. In dem Maße aber, als der Kolben steigt, wird auch der Schieber gehoben; er erreicht seine höchste Stellung, wenn der aufsteigende Kolben gerade die Mitte des Cylinders erreicht, also seine größte Geschwindigkeit erlangt hat. In diesem Momente ist die untere Öffnung ganz frei, Fig. 546, so daß der Dampf mit voller Kraft in den unteren Teil des Cylinders einströmen kann, während der verbrauchte Dampf aus dem oberen Teil des Cylinders durch den Kanal e und die Höhlung des Schiebers nach g gelangt und von da durch r (in Fig. 546 und 547 steht a an der Stelle von r) entweicht.

Nähert sich der Kolben mit abnehmender Geschwindigkeit dem oberen Ende des Cylinders, so geht der Schieber allmälich wieder nieder, um alle Öffnungen in dem Augenblicke zu schließen, in welchem der Kolben das oberste Ende seiner Bahn erreicht. Während darauf der Kolben wieder niedergeht, fährt auch die niedergehende Bewegung des Schiebers noch fort, bis der Kolben wieder in der

Mitte des Cylinders angekommen ist, wo dann die obere Öffnung ganz frei ist, Fig. 547, und der Dampf aus der unteren Hälfte des Cylinders durch die

Fig. 546.

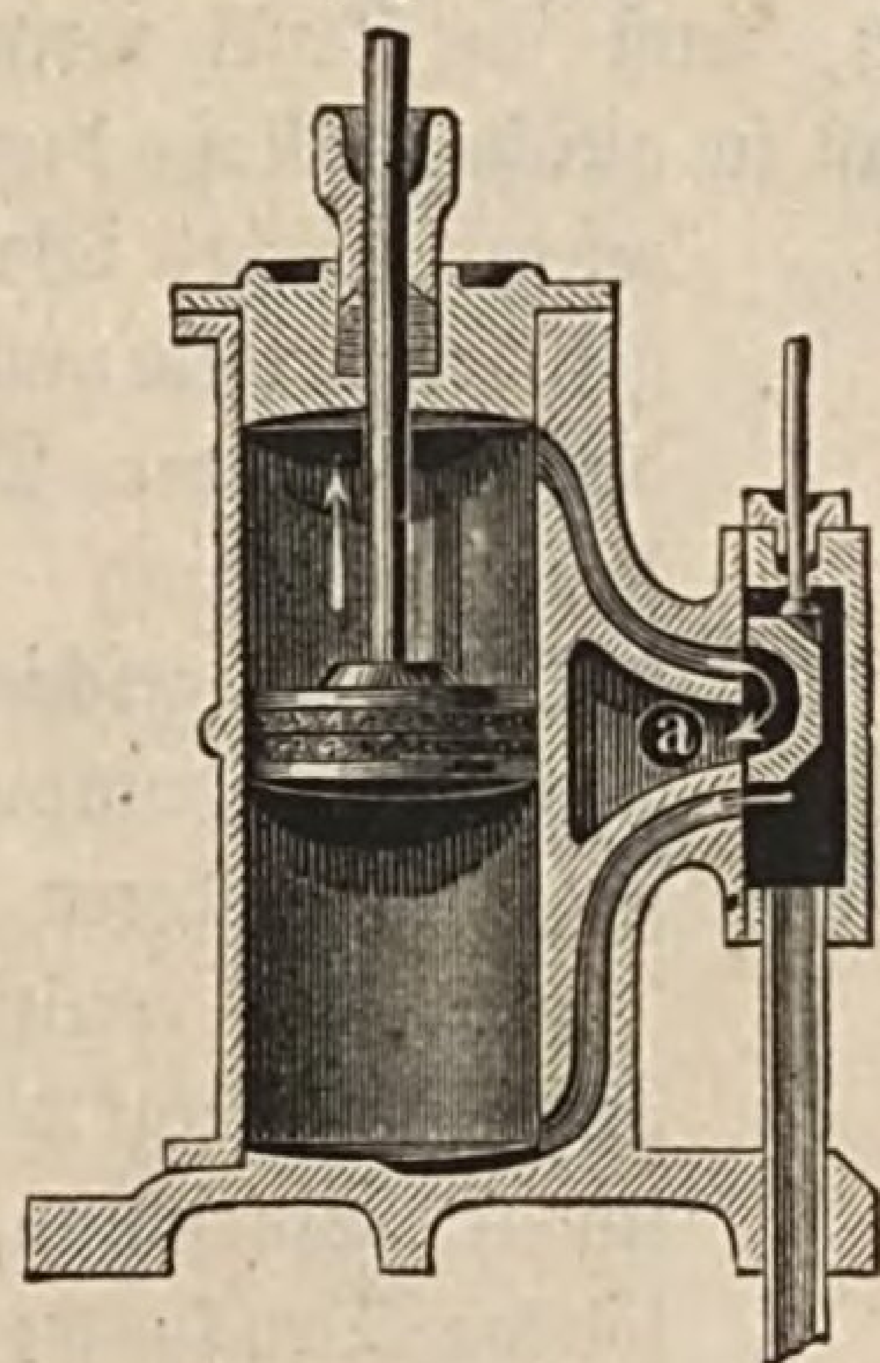
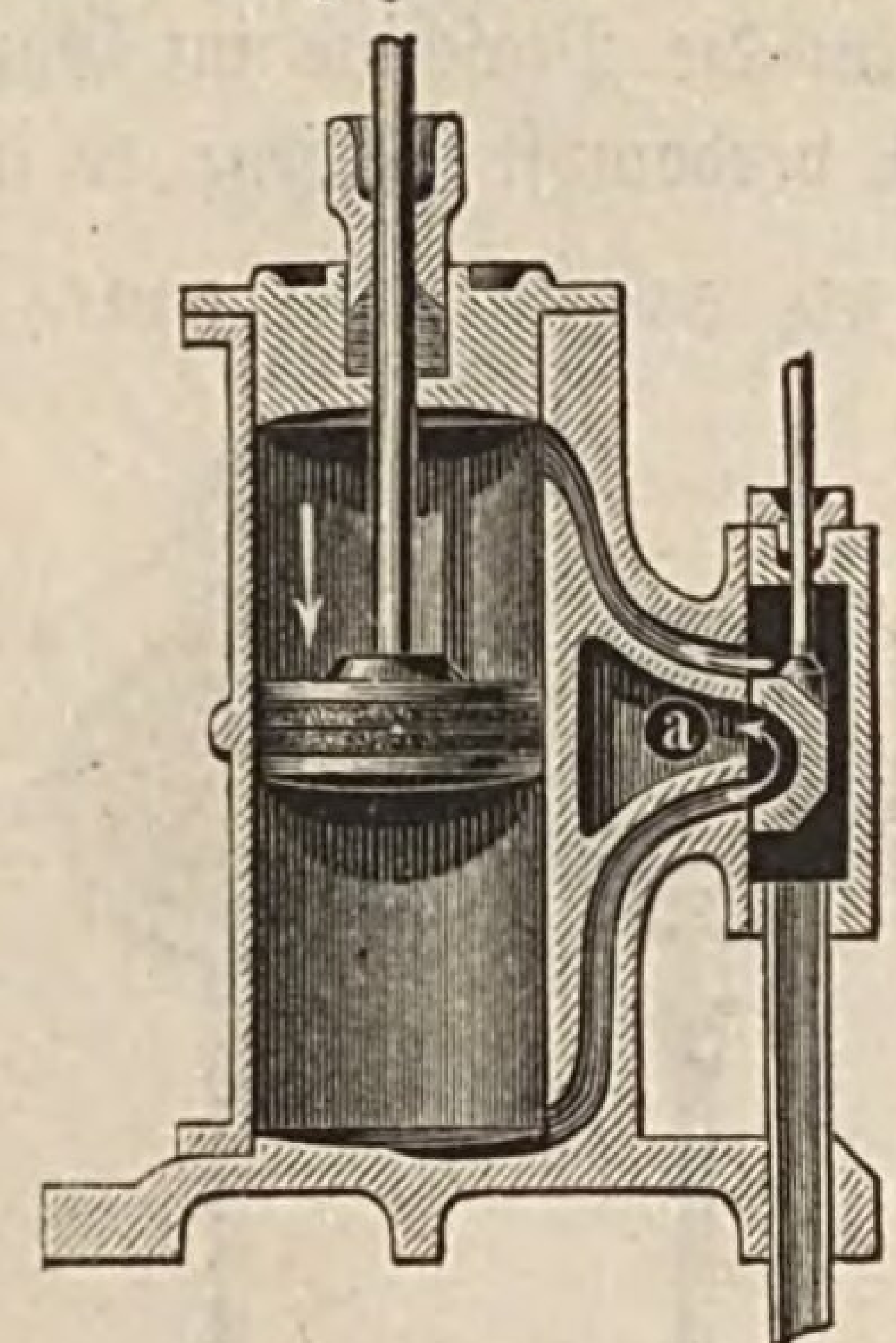


Fig. 547.



Höhlung des Schiebers entweicht. Die Bewegungen des Kolbens und des Schiebers kann man als schwingende betrachten, und zwar eilt die Bewegung des Schiebers der des Kolbens um eine Viertelschwingungsdauer voraus.

Die Bewegung des Verteilungsschiebers muß natürlich durch die Maschine selbst bewerkstelligt werden, und zwar geschieht dies durch die excentrische Scheibe *f*, die wir in Fig. 543 von der Seite sehen. Fig. 548, 549 und 550 (a. f. S.) zeigen dieselbe von vorn gesehen in den drei Hauptstellungen.

Die excentrische Scheibe ist eine kreisförmige Scheibe, die an der Hauptachse der Maschine befestigt ist, deren Mittelpunkt aber mit dem Mittelpunkte der Achse zusammenfällt, so daß bei jeder Umdrehung der Achse der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe einen kleinen Kreis zu beschreiben hat, dessen Durchmesser der Bahn gleich ist, welche der Schieber bei seiner auf- und niedergehenden Bewegung zurücklegt.

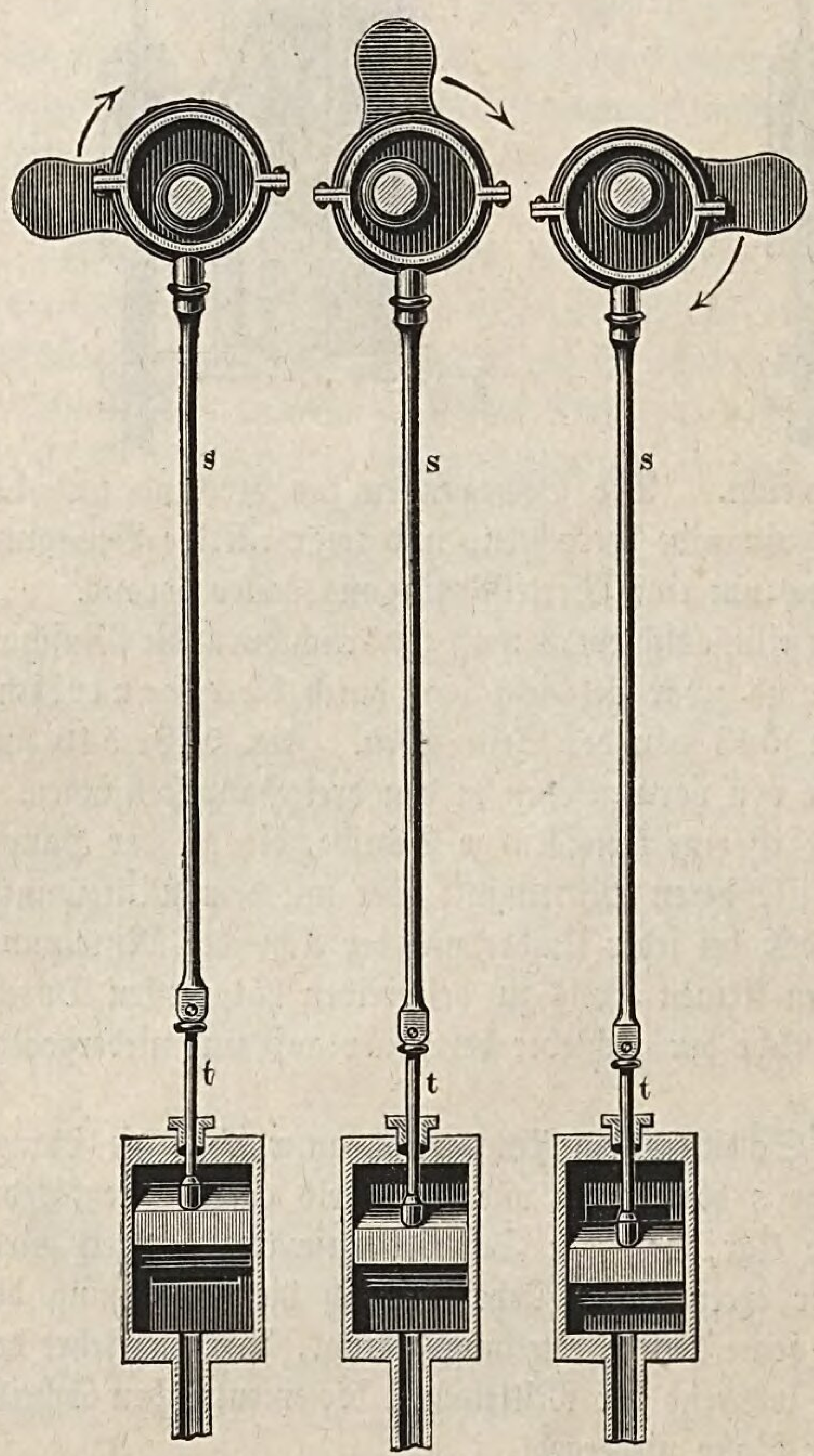
Um den Umfang dieser Scheibe ist ein Ring gelegt, an welchem die Stange *s* befestigt ist; an der Stange *s* hängt nun wieder mittels eines Gelenkes die Schieberstange *t*, und so ist klar, daß der Schieber aufwärts gezogen wird, während der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe durch die Umdrehung der Achse aus seiner tiefsten in seine höchste Stellung gelangt, daß umgekehrt der Schieber niedergedrückt wird, während der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe auf der anderen Hälfte seiner Bahn niedergeht.

Da der Dampf unten voll einströmen muß, wenn der Kolben in aufgehender Bewegung die Mitte des Cylinders passiert, so muß der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe seinen höchsten Stand einnehmen, wenn der Kurbelarm eben wagerecht steht, Fig. 548. Gelangt der Kurbelarm in seine höchste Stellung, so daß er vertikal nach oben gerichtet ist, so steht jetzt der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe in gleicher Höhe mit dem Mittelpunkt der Achse, der Schieber befindet sich gerade in der Mitte seiner Bahn und verschließt alle Öffnungen, Fig. 549. Wenn der Kolben, nach unten gehend, die Mitte des

Cylinders passiert, so steht die Kurbel wieder wagerecht und die excentrische Scheibe nimmt ihre tiefste Stellung ein, damit der Dampf frei durch die obere Öffnung einströmen kann, Fig. 550.

Um die Maschine im Gange zu erhalten, muß im Kessel fortwährend Wasser verdampft werden; es ist also klar, daß in gleichem Maße dem Kessel wieder frisches Wasser zugeführt werden muß, wenn der Gang der Maschine keine Störung erleiden soll. Dies geschieht nun durch die Druckpumpe *o*, Fig. 543, deren Kolben durch die excentrische Scheibe *g* bewegt wird. Die innere Einrichtung einer solchen Druckpumpe haben wir bereits oben S. 104 kennen gelernt.

Fig. 548. Fig. 549. Fig. 550.



Wenn die von der Maschine zu verrichtende Arbeit im Allgemeinen ab- oder zunimmt, so wird der Gang der Maschine schneller oder langsamer. Momentane kurz dauernde Störungen der Art werden schon durch das Schwungrad ausgeglichen; eine länger andauernde Verminderung der zu verrichtenden Arbeit aber würde bei unverändertem Zuflusse des Dampfes eine zunehmende Beschleunigung des Ganges der Maschine zur Folge haben. Damit nun die Geschwindigkeit nicht über eine gewisse Grenze wachsen kann, ist im Dampfzuflußrohre eine Klappe, das Drosselventil, angebracht, durch deren Drehung dem Dampfe der Weg mehr oder weniger versperrt wird, je nachdem sie mehr und mehr aus der Stellung der vollkommenen Öffnung in die des vollkommenen Verschlusses übergeht. Die Drehung dieser Klappe muß aber durch die Maschine selbst besorgt werden, und dies geschieht durch eine Vorrichtung, welche den Namen Regulator führt.

Die Bewegung der Hauptachse wird durch Winkelräder auf eine vertikale

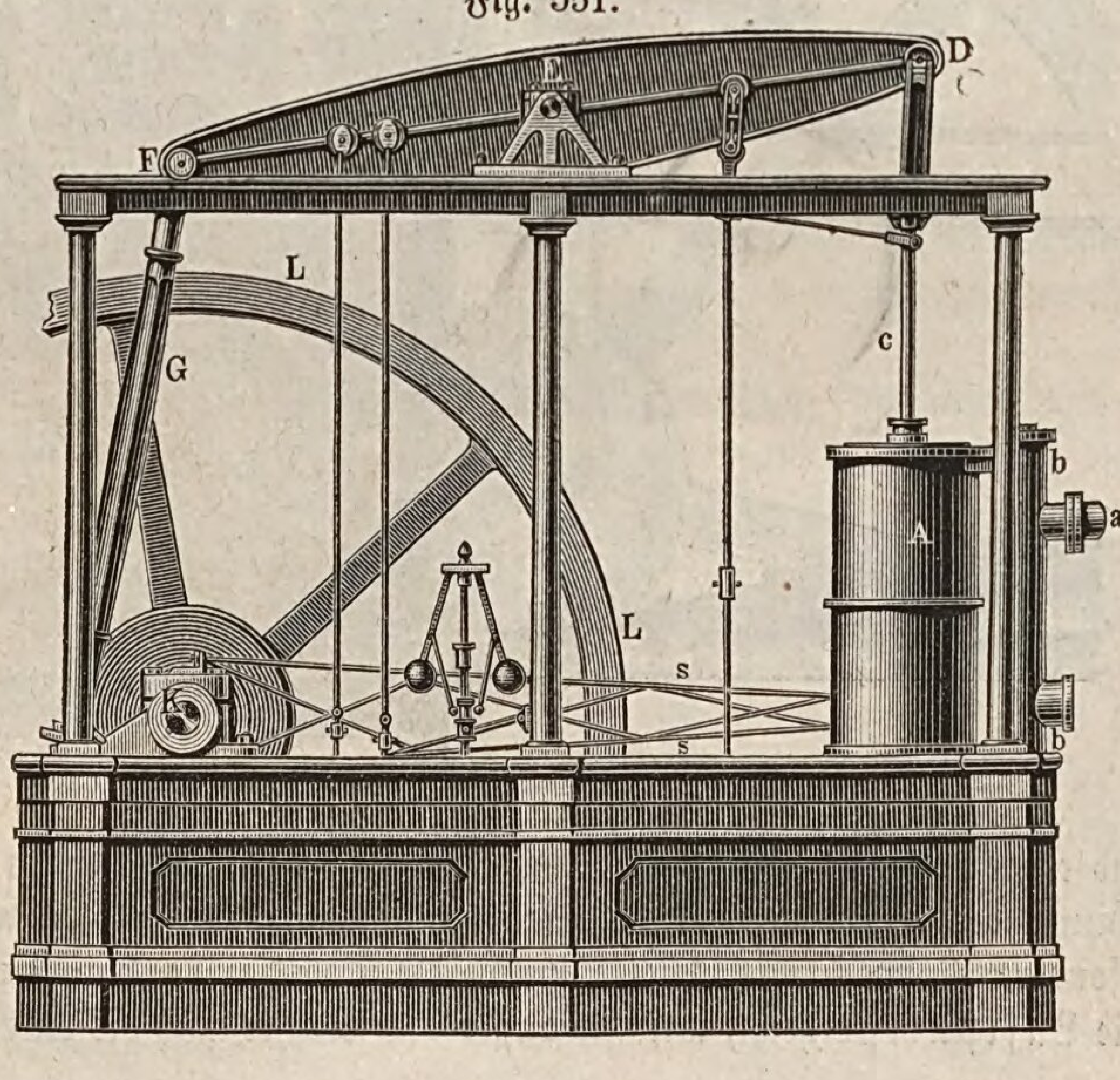
Achse a, Fig. 543, übertragen, welche das **konische Pendel** V trägt; es besteht dies aus zwei schweren Kugeln, die an das obere Ende der Stange a so angehängt sind, daß sie vermöge ihrer Centrifugalkraft auseinanderfahren, wenn die Achse a rasch umgedreht wird; sobald dies aber geschieht, wird die Hülse h gehoben und dadurch die Stange b in die Höhe gezogen (in Fig. 543 ist dieselbe nur durch eine Linie angedeutet), dadurch aber wird das Drosselventil um seine Achse gedreht und so der Zufluß des Dampfes um so mehr gehemmt, je rascher die Maschine läuft.

Niederdruckmaschinen. Bei den Hochdruckmaschinen ist die eine Seite des Cylinders mit der atmosphärischen Luft in Verbindung, so daß auf dieser Seite des Kolbens der Druck der Atmosphäre lastet, während auf der anderen Seite der Druck des Dampfes wirkt; es ist klar, daß hier der Dampfdruck ein bedeutender sein muß, da ja ein Teil desselben noch zur Überwindung des Luftdrucks verwandt wird und nur der Rest der Bewegung zu gut kommt. 272

Soll aber die Maschine schon durch Dampf von geringer Spannkraft getrieben werden, so darf man auf der anderen Seite des Kolbens nicht die atmosphärische Luft drücken lassen, sondern man muß einen verdünnten Raum erzeugen; dies geschieht dadurch, daß man die verbrauchten Dämpfe nicht in die freie Luft ausströmen läßt, sondern daß man sie zu einem Behälter, dem **Kondensator**, hinleitet, in welchem sie durch Einspritzen von kaltem Wasser verdichtet werden.

Watt's Maschinen waren Niederdruckmaschinen. Fig. 551 stellt eine

Fig. 551.



Totalansicht, Fig. 552 stellt den Durchschnitt des unteren Teils der Maschine dar. Der Verteilungsschieber hat hier eine etwas andere Einrichtung als der früher betrachtete. Der verbrauchte Dampf strömt durch den Kanal *d*, Fig. 552, nach dem Kondensator *e*, in welchem die Verdichtung der Dämpfe durch fort-

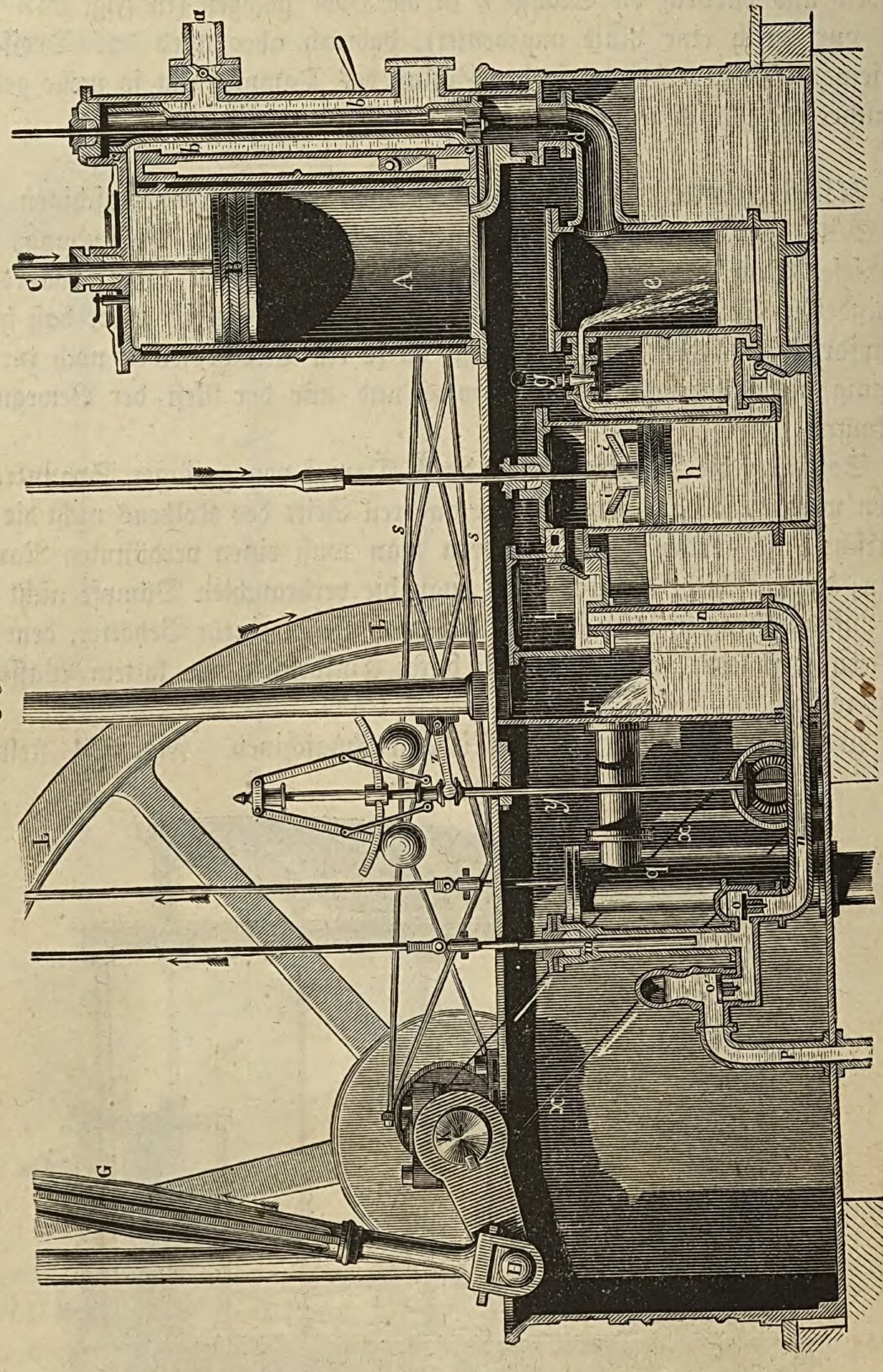


Fig. 552.

während eingespritztes Wasser bewirkt wird. Das durch Einspritzen und durch Verdichtung der Dämpfe im Kondensator sich sammelnde Wasser wird durch eine besondere Pumpe *h* fortgeschafft, welche die Kondensator-Pumpe oder auch die Luftpumpe heißt, weil sie außer dem Wasser auch die Luft fortschafft,

welche im Kessel beim Kochen des Wassers frei wird und mit den Dämpfen durch die Maschine geht.

Bei der Watt'schen Maschine wird die Bewegung der Kolbenstange zunächst auf einen zweiarmigen Hebel, den Balancier *DF*, Fig. 551, übertragen, an dem auch die Treibstange *G* befestigt ist, welche die Umdrehung der Kurbel bewirkt.

Auch hier geschieht die Führung des Schiebers durch eine excentrische Scheibe, und der Regulator dieser Maschine wirkt ganz in ähnlicher Weise, wie bei der Hochdruckmaschine.

Die Lokomotive ist eine Hochdruckmaschine mit horizontal liegenden Cylindern. Fig. 553 (a. f. S.) zeigt die Ansicht einer Lokomotive von eben so zweckmäßiger als auch übersichtlicher Konstruktion. Die Hauptmasse der Lokomotive bildet der cylindrische Dampfkessel, dessen Durchschnitt in Fig. 554 (a. S. 531) dargestellt ist und welcher später noch besprochen werden soll. Der vom Dampfkessel gelieferte Dampf gelangt von dem Dampfraum *F* aus auf jeder Seite des Kessels durch ein Rohr, welches durch die kastenartige Verschalung *a*, Fig. 553, verdeckt wird, in den Dampfkasten *b*, auf dessen etwas gegen die Horizontale geneigtem Boden der Verteilungsschieber liegt, welcher den Dampf bald auf die eine, bald auf die andere Seite des Dampfcylinders *c* führt. In diesem Cylinder wird dann ein Kolben bald nach der einen, bald nach der anderen Seite getrieben und die Bewegung desselben ganz in derselben Weise auf eine Kurbel übertragen, wie wir sie bei der Dampfmaschine Fig. 544 kennen lernten, mit dem einzigen Unterschiede, daß hier der Cylinder horizontal liegt, und sich der Kolben samt der Kolbenstange in horizontaler Richtung hin- und herbewegt, während bei der Maschine Fig. 544 diese Bewegungen in vertikaler Richtung vor sich gingen. 273

Man wird ohne Schwierigkeit in Fig. 553 die durch den linken Deckel des Cylinders *c* austretende Kolbenstange, die Treibstange und die Kurbel auffinden können. Die Achse dieser Kurbel bildet nun zugleich die Umdrehungsachse der Treibräder, deren Umdrehung eben das Fortrollen der ganzen Lokomotive bewirkt.

Die Führung des Verteilungsschiebers wird auch hier durch eine excentrische Scheibe besorgt. Unsere Figur zeigt deren zwei dicht hinter einander liegende, welche in ihrem Gange um 180° verschieden sind, so daß sie gleichzeitig in den entgegengesetzten extremen Stellungen ankommen. Die Stange der vorderen excentrischen Scheibe ist an dem oberen, die Stange der hinteren excentrischen Scheibe ist an dem unteren Ende des eisernen Bügels *df* befestigt, welcher um seinen festen Mittelpunkt *g* in vertikaler Ebene drehbar ist. Dieser Bügel wird demnach während des Ganges der Maschine in der Weise hin- und hergezogen, daß *d* seine äußerste Stellung links hat, wenn *f* am weitesten nach rechts steht (wie es eben unsere Figur zeigt), während nach einer halben Umdrehung der Kurbelachse umgekehrt *d* in die äußerste Stellung rechts, *f* in die äußerste Stellung links kommt.

In diesen Bügel greift nun die Stange hi ein, an deren anderem Ende die Schieberstange befestigt ist. Bei der Stellung, welche unsere Figur zeigt, hat d, also auch die Stange hi und der Schieber, die äußerste Stellung links; der Dampf tritt also auf der rechten Seite in den Cylinder ein und der Kolben

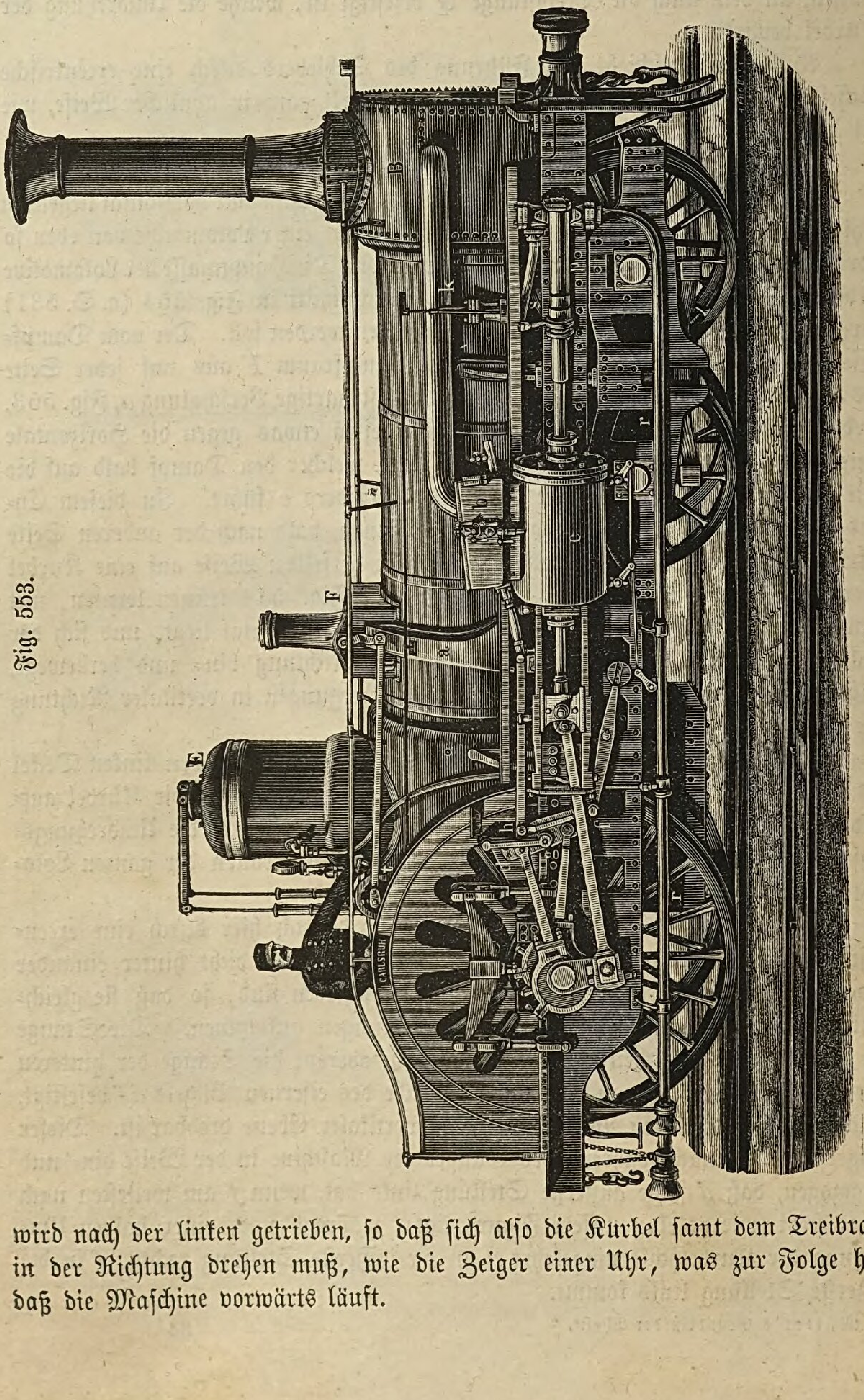


Fig. 553.

wird nach der linken getrieben, so daß sich also die Kurbel samt dem Treibrade in der Richtung drehen muß, wie die Zeiger einer Uhr, was zur Folge hat, daß die Maschine vorwärts läuft.

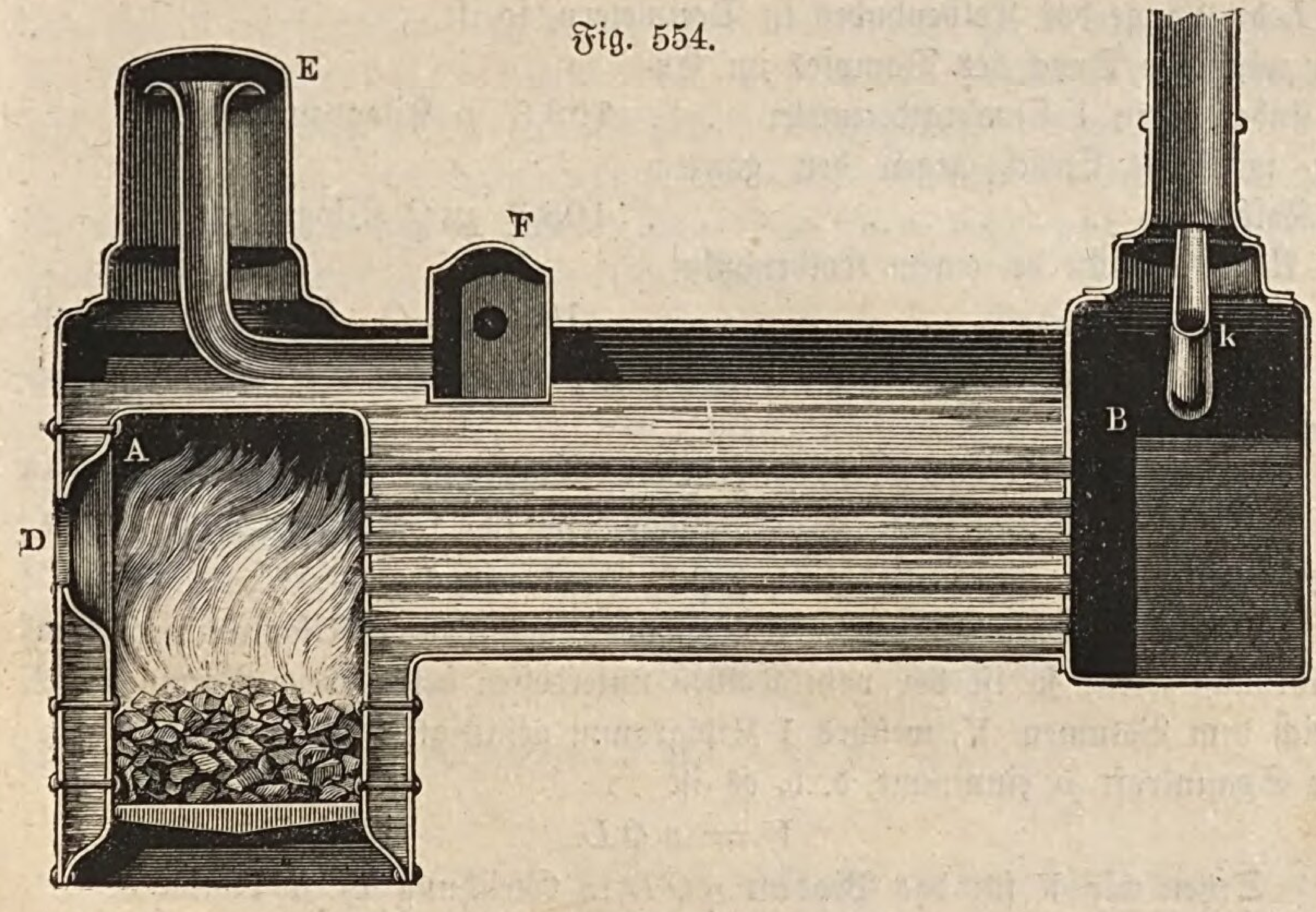
Um rückwärts zu fahren, wird das eine Ende h der Stange hi mittels einer besonderen Hebelvorrichtung niedergedrückt, so daß h an das untere Ende des Bügels df kommt; dadurch wird die Führung des Schiebers der hinteren excentrischen Scheibe übertragen, welcher die entgegengesetzte Umdrehung der Kurbel entspricht.

Der verbrauchte Dampf entweicht durch das Rohr k, Fig. 554, in den Schornstein.

An dem in dem Dampfcylinder c, Fig. 553, sich hin- und herbewegenden Kolben ist auf der rechten Seite gleichfalls eine Kolbenstange befestigt, welche durch eine Stopfbüchse aus dem Cylinder austritt und an welcher unmittelbar ein etwas dickerer messingener Cylinder angesetzt ist, welcher als Kolben der Druckpumpe p arbeitet. Diese Druckpumpe saugt das Wasser durch das Rohr r aus dem Tender und preßt es durch das kurze Rohr s in den Kessel hinein, so daß das durch die fortwährende Dampfbildung konsumierte Wasser stets wieder ersetzt wird.

Fig. 554 zeigt einen Längendurchschnitt des Lokomotivkessels. Aus dem von allen Seiten mit Wasser umgebenen Feuerraum A, in welchen das Brenn-

Fig. 554.



material durch die mit einer Thür verschließbare Öffnung D geworfen wird, führt eine große Anzahl schmiedeiserner Röhren die erhitzte Luft durch die ganze Länge des Kessels hindurch in die Rauchkammer B, aus welcher sie dann in den Schornstein entweicht.

Die auf beiden Seiten der Rauchkammer B eintretenden Röhren k vereinigen sich in der Mitte zu einer gemeinschaftlichen Mündung, aus welcher der verbrauchte Dampf mit solcher Gewalt in den Schornstein einströmt, daß dadurch ein Teil der Luft aus der Rauchkammer B mitgerissen wird. Dadurch

wird ein lebhaftes Nachströmen der erhitzten Luft von A her durch die Röhren bewirkt und die lebhafte Verbrennung im Feuerraume eben so erhalten, als ob ein ungleich höherer Schornstein auf die Rauchkammer aufgesetzt wäre.

Der in dem Kessel gebildete Dampf sammelt sich nun vorzugsweise in der Kuppel E, von wo er durch ein weites Rohr in das Kästchen F geführt wird. Von F führt dann auf jeder Seite ein Rohr den Dampf weiter zur Maschine. Die Mündung dieser Röhre ist durch einen Schieber verschließbar, welchen der Führer mittels des Hebels tu, Fig. 553, vor- und zurückschieben kann, wodurch dann überhaupt der Dampf zur Maschine zugelassen, oder, wenn die Maschine stillstehen soll, wieder abgesperrt wird.

274 **Berechnung des Effektes der Dampfmaschine.** Es bezeichne

p die in Atmosphären ausgedrückte Spannkraft des Dampfes im Cylinder, von welcher wir annehmen wollen, daß sie der Spannkraft des Dampfes im Kessel gleich sei,

Q den Querschnitt des Kolbens in Quadratcentimetern,

L die Länge des Kolbenhubes in Decimetern, so ist

der wirksame Druck des Dampfes im Cylinder gegen 1 Quadratdecimeter . .	$103{,}3\ p$ Kilogramm
der wirksame Druck gegen den ganzen Kolben	$103{,}3\ p\ Q$ Kilogramm
die Arbeit, welche bei einem Kolbenhube entwickelt wird	$10{,}33\, p\,.\,Q\,.\,L$ Meterkilogramm.

Demnach ergiebt sich für die Arbeit E, welche bei n Kolbenhüben entwickelt wird,

$$E = 10{,}33\, p\,.\,n\,.\,Q\,.\,L \text{ Meterkilogramm} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

Das vom Kolben beschriebene Volumen ist für 1 Kolbenhub gleich QL, für n Kolbenhübe ist es also gleich $n\,QL$ Kubikdecimeter.

Macht nun der Kolben n Kolbenhübe, während 1 Kilogramm Dampf verbraucht wird, so ist der vom Kolben unterdessen beschriebene Raum $n\,QL$ gleich dem Volumen V, welches 1 Kilogramm gesättigten Wasserdampfes von der Spannkraft p einnimmt, d. h. es ist

$$V = n\,QL.$$

Setzen wir V für das Produkt $n\,QL$ in Gleichung 1), so kommt

$$E = 10{,}33\ p\,.\,V \text{ Meterkilogramm} \quad \ldots\ldots \quad 2)$$

Dieser Wert von E ist die volle m e c h a n i s c h e A r b e i t, welche 1 Kilogramm Wasserdampf, der in der angedeuteten Weise in einer Dampfmaschine verwendet wird, zu leisten im Stande ist.

Nach den Angaben in §. 267 S. 516 ist das Produkt:

$10{,}33\ p\ V$ für $p = 1$ Atmosphäre	Spannkraft	gleich	16913
„ $p = 4$ Atmosphären	„	„	17015
„ $p = 10$ „	„	„	18800

Nehmen wir an, daß eine Zeit von t Sekunden nötig sei, um im Kessel einer Dampfmaschine 1 Kilogramm Wasser zu verdampfen, so ist die in 1 Sekunde geleistete mechanische Arbeit

$$e = \frac{E}{t} = \frac{10{,}33\ p\ V}{t}.$$

Da man für die Arbeit einer Pferdekraft 75 Meterkilogramm in 1 Sekunde annimmt, so muß für eine Dampfmaschine, deren Arbeit gleich der einer Pferdekraft sein soll, $e = 75$ Meterkilogramm, oder

$$\frac{10{,}33\ p\ V}{t} = 75$$

und somit auch

$$t = \frac{10{,}33\ p\ V}{75}$$

sein. Für $p = 4$ Atmosphären erhalten wir also

$$t = \frac{17015}{75} = 227'',$$

d. h. eine Dampfmaschine, welche bei einem Dampfdruck von 4 Atmosphären die Arbeit einer Pferdekraft leisten soll, wird in 227 Sekunden 1 Kilogramm, also in einer Stunde nahezu 15 Kilogramm Wasserdampf verbrauchen.

Bei geringerer Spannkraft des Dampfes sind zur Erzeugung einer Pferdekraft etwas mehr, bei höherer Spannkraft etwas weniger als 15 Kilogramm Wasserdampf per Stunde erforderlich.

Ein Teil der oben mit E bezeichneten durch den Wasserdampf in einer Dampfmaschine geleisteten Arbeit wird verwendet, um den auf der anderen Seite des Kolbens lastenden Druck zu überwinden, welcher bei Hochdruckmaschinen eine Atmosphäre, bei Niederdruckmaschinen einen Bruchteil einer Atmosphäre beträgt; ein anderer Teil der Arbeit des Dampfes wird zur Überwindung von Reibungswiderständen ꝛc. verbraucht. Wie groß der zu nutzbarer Verwendung übrig bleibende Teil von E ist, hängt von der mehr oder minder zweckmäßigen Konstruktion der Maschine ab. Im Durchschnitt beträgt die nutzbar verwendbare Arbeit der Dampfmaschine nicht viel mehr als $\frac{E}{2}$.

Abhängigkeit des Siedepunktes vom Drucke. Die Verwandlung der Flüssigkeiten in gasförmige Körper nennt man im allgemeinen *Verdampfung*. Die Flüssigkeiten verdampfen entweder durch das *Sieden* oder *Kochen*, wenn sich aus der ganzen Masse der Flüssigkeit Dämpfe bilden, oder durch *Verdunsten*, wenn die Dampfbildung bloß an der Oberfläche vor sich geht. 275

An einer siedenden Flüssigkeit beobachtet man in der Regel nur eine mehr oder minder heftige Bewegung aller Teilchen; wenn man aber die Flüssigkeit in einem gläsernen Gefäße sieden läßt, so sieht man wie die Dampfblasen sich an den wärmeren Gefäßwänden bilden und in die Höhe steigen. Anfangs klein,

nehmen sie an Volumen zu, je mehr sie steigen. An den heißesten Stellen der Wand folgen die Blasen am schnellsten auf einander. Damit sich die Blasen in der Flüssigkeit bilden können, muß der Dampf, welcher die Blasen ausfüllt, offenbar eine Spannkraft haben, welche dem auf ihm lastenden Druck das Gleichgewicht hält. Daraus folgt aber, daß die Temperatur, bei welcher eine Flüssigkeit ins Sieden kommt, von dem Drucke abhängig ist, welcher auf ihr lastet.

Am Spiegel des Meeres und unter dem mittleren Drucke von 760 mm siedet das reine Wasser bei 100°; auf dem Gipfel des Montblanc, in einer Höhe von 4775 m, wo der Druck der Atmosphäre nur noch 417 mm beträgt, kocht das Wasser schon bei einer Temperatur, bei welcher die Spannkraft des Wasserdampfes 417 mm beträgt, d. i. ungefähr bei 84°. In noch größerer Höhe würde das Wasser bei noch niedrigerer Temperatur sieden. Wenn man für jede Temperatur die Spannkraft der Dämpfe einer Flüssigkeit kennt, so kann man leicht die Temperatur des Siedepunktes bei gegebenem Drucke finden; denn es ist derjenige Temperaturgrad, für welchen die Spannkraft des gesättigten Dampfes jenem Drucke gleich ist.

Bei einem Drucke von 30 mm ist die Siedetemperatur des Wassers 30°, weil bei dieser Temperatur die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes 30 mm beträgt. Unter einem Drucke von 10 mm siedet das Wasser bei 11°, unter einem Drucke von 5 mm bei 0°.

Die Wahrheit dieser Folgerungen läßt sich leicht durch den Versuch nachweisen. Man bringt warmes Wasser in einem Glasgefäße unter den Recipienten der Luftpumpe. Nach einigen Kolbenzügen beginnt das Kochen mit Heftigkeit gerade so, als ob das Wasser an freier Luft über einem lebhaften Feuer stände. Dieses Sieden hört aber bald auf, weil der Dampf den Recipienten erfüllt und selbst auf die Flüssigkeit drückt; ein neuer Kolbenzug aber nimmt diesen Dampf wieder weg und bewirkt, daß das Kochen von neuem beginnt.

Hierher gehört auch der folgende Versuch. Ein Glasballon *B* mit langem Halse wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt; wenn durch Kochen desselben alle Luft ausgetrieben ist, wird das Rohr mit einem wohlschließenden Kork geschlossen und der Apparat umgekehrt in das Wasser eines Gefäßes *V* eingetaucht, wie Fig. 555 zeigt. Wenn man ihn sich selbst überläßt, ist kein Sieden zu beobachten; sobald man aber kaltes Wasser auf den oberen Teil gießt, so beginnt es auf der Stelle mit großer Heftigkeit. Das kalte Wasser bringt das Wasser im Ballon ins Kochen, weil es den Dampf im oberen Teile des Ballons verdichtet und so den auf der Flüssigkeit lastenden Druck vermindert.

Wenn man den Druck auf die Flüssigkeit vermehrt, so wird der Siedepunkt erhöht, wie wir dies bereits bei dem kleinen Dampfkessel auf Seite 516 gesehen haben. Die ersten derartigen Versuche machte schon Papin, welcher in der Mitte des 17. Jahrhunderts in Marburg lebte und mit dem nach ihm benannten Papinianischen Topfe oder Digestor, der im wesentlichen nichts anderes ist als ein kleiner mit einem Sicherheitsventile versehener Dampfkessel, nicht allein die große mechanische Kraft des Dampfes nachwies, sondern auch zeigte, daß man Fleisch, Knochen &c. in einem solchen Topfe

bei erhöhter Temperatur und vermehrtem Drucke weit vollständiger extrahieren kann als bei der gewöhnlichen Siedetemperatur.

Wenn man Wasser in einem Gefäße ins Kochen bringt, aus welchem der Dampf nur durch verhältnismäßig kleine Öffnungen abziehen kann, so beob-

Fig. 555.

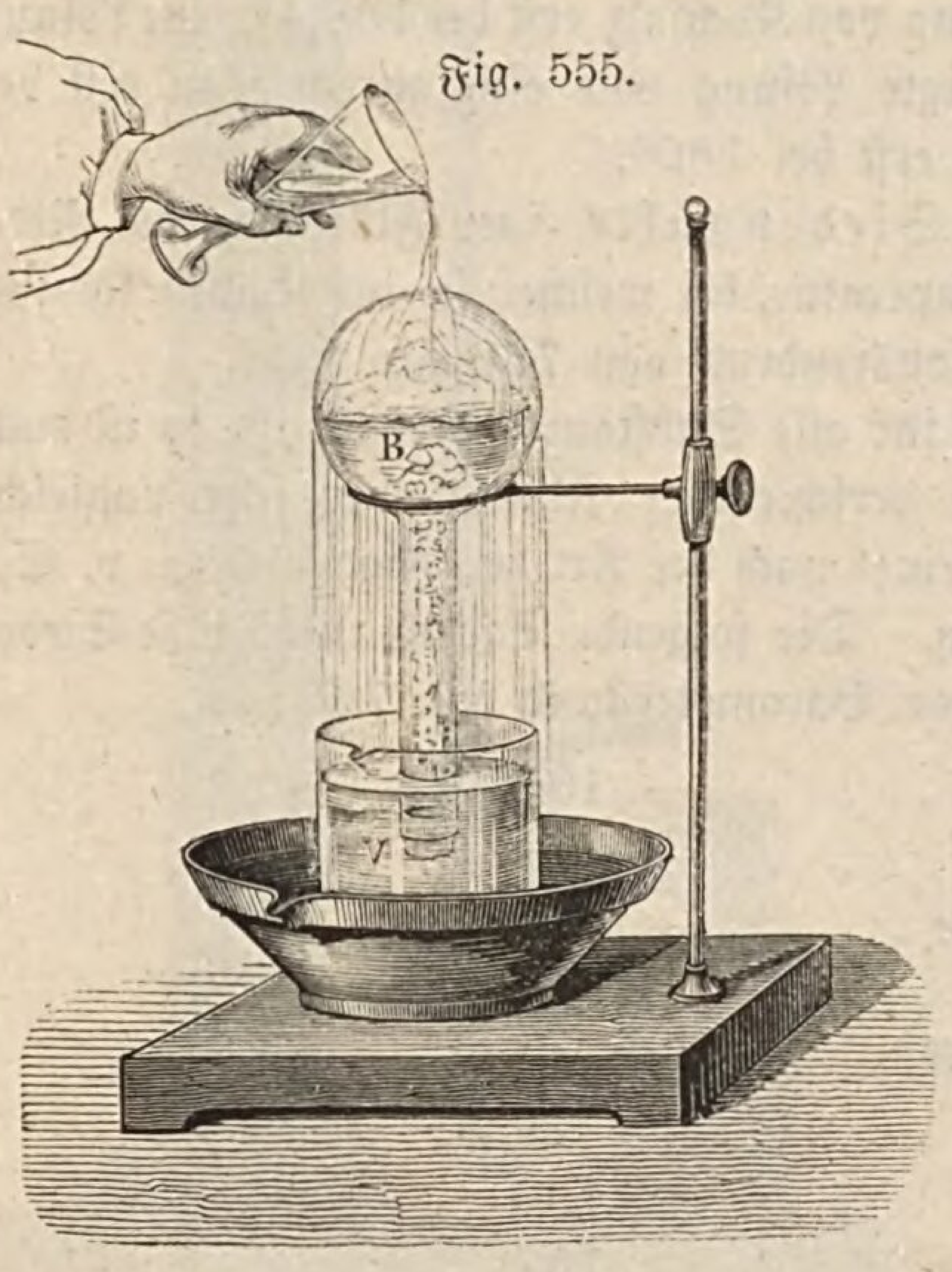
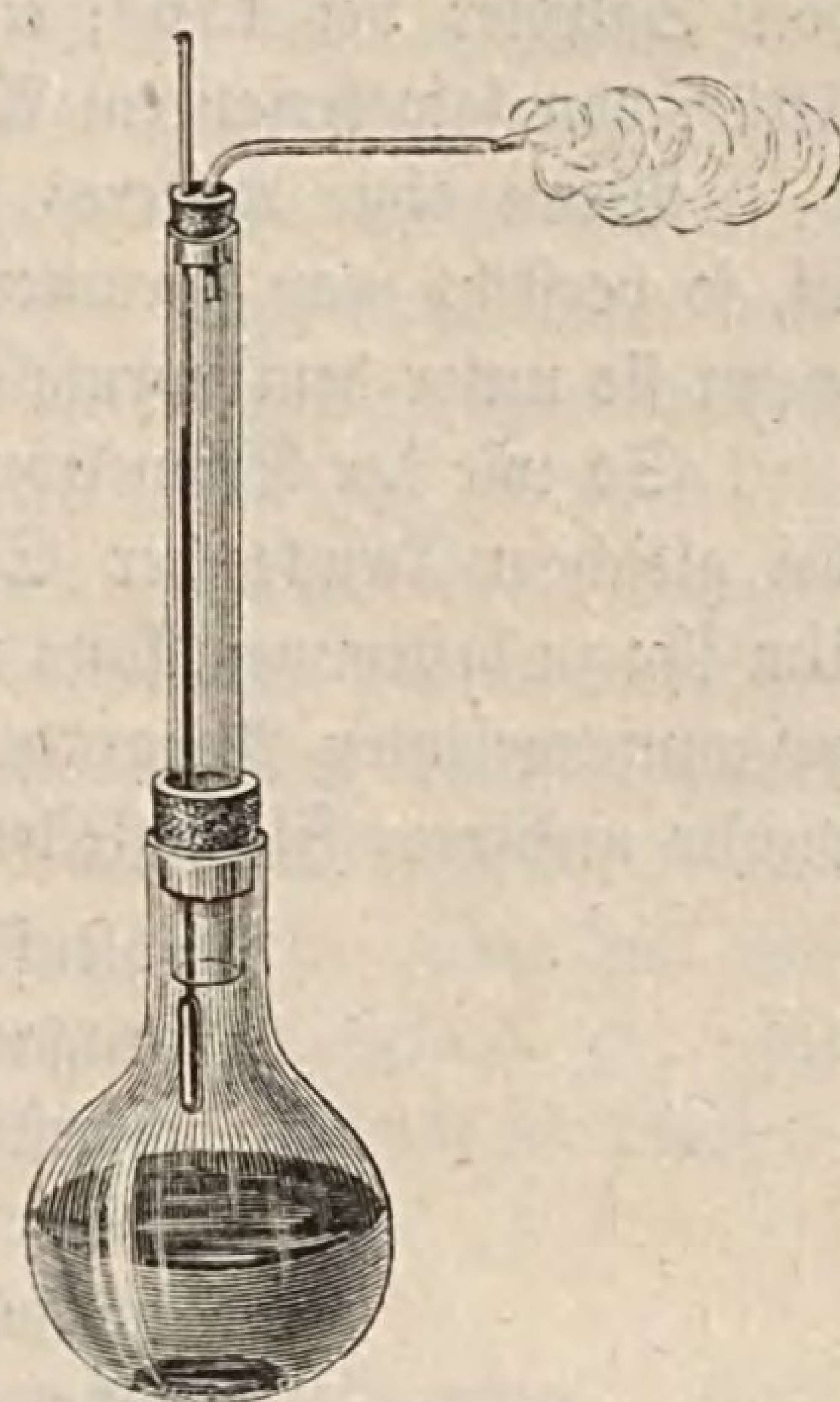


Fig. 556.



achtet man eine Erhöhung des Siedepunktes. Durch eine kleine Öffnung kann nämlich nur dann aller Dampf, welcher durch die in jedem Momente in die Flüssigkeit übergehende Wärme erzeugt wird, ausströmen, wenn durch die größere Spannkraft des Dampfes eine größere Ausströmungsgeschwindigkeit möglich geworden ist.

In einer flüssigen Masse wirkt auf die Teilchen im Innern nicht allein der Druck, welcher auf der Oberfläche lastet, sondern auch noch das Gewicht einer Flüssigkeitssäule. Hätte man z. B. einen 10 m tiefen, mit Wasser gefüllten Kessel, so würde am Boden ein Druck von 2 Atmosphären stattfinden, und hier würden sich also erst bei einer Temperatur von 121,4^0 Dampfblasen bilden können.

Wenn das Wasser in einem etwas tiefen Gefäße von unten erwärmt wird, so werden die am Boden sich bildenden Dampfblasen beim Aufsteigen an Größe zunehmen, weil der auf ihnen lastende Druck nach oben hin immer mehr abnimmt, vorausgesetzt, daß die ganze Wassersäule, welche sie zu durchsteigen haben, an jeder Stelle bereits bis zu dem Siedepunkte erwärmt ist, welcher dem hier herrschenden Drucke entspricht.

Sind aber die oberen Wasserschichten noch nicht bis zu dem entsprechenden Siedepunkte erwärmt, so werden die aufsteigenden Dampfblasen alsbald wieder verdichtet, wobei die Wasserteilchen gegen einander schlagen. Daher rührt auch das eigentümliche Geräusch, welches man einige Augenblicke vor dem vollständigen Kochen wahrnimmt. Wenn man den Versuch in einem Glaskolben anstellt, so

beobachtet man, wie sich die Blasen am Boden bilden, wie sie steigen und alsbald verschwinden. Man sagt alsdann, das Wasser singt. Das Singen ist ein Zeichen des bald erfolgenden vollständigen Kochens.

Durch Substanzen, welche im Wasser aufgelöst sind, wird das Sieden verzögert; so siedet eine gesättigte Lösung von Kochsalz erst bei 108,4°, eine Lösung von Salpeter bei 116°; eine gesättigte Lösung von essigsaurem Kali erst bei 169°, von salpetersaurem Ammoniak erst bei 180°.

Wenn ohne weiteres von dem Siedepunkte einer Flüssigkeit die Rede ist, so versteht man darunter die Temperatur, bei welcher sie ins Kochen kommt, wenn sie unter dem normalen Atmosphärendruck von 760 mm steht.

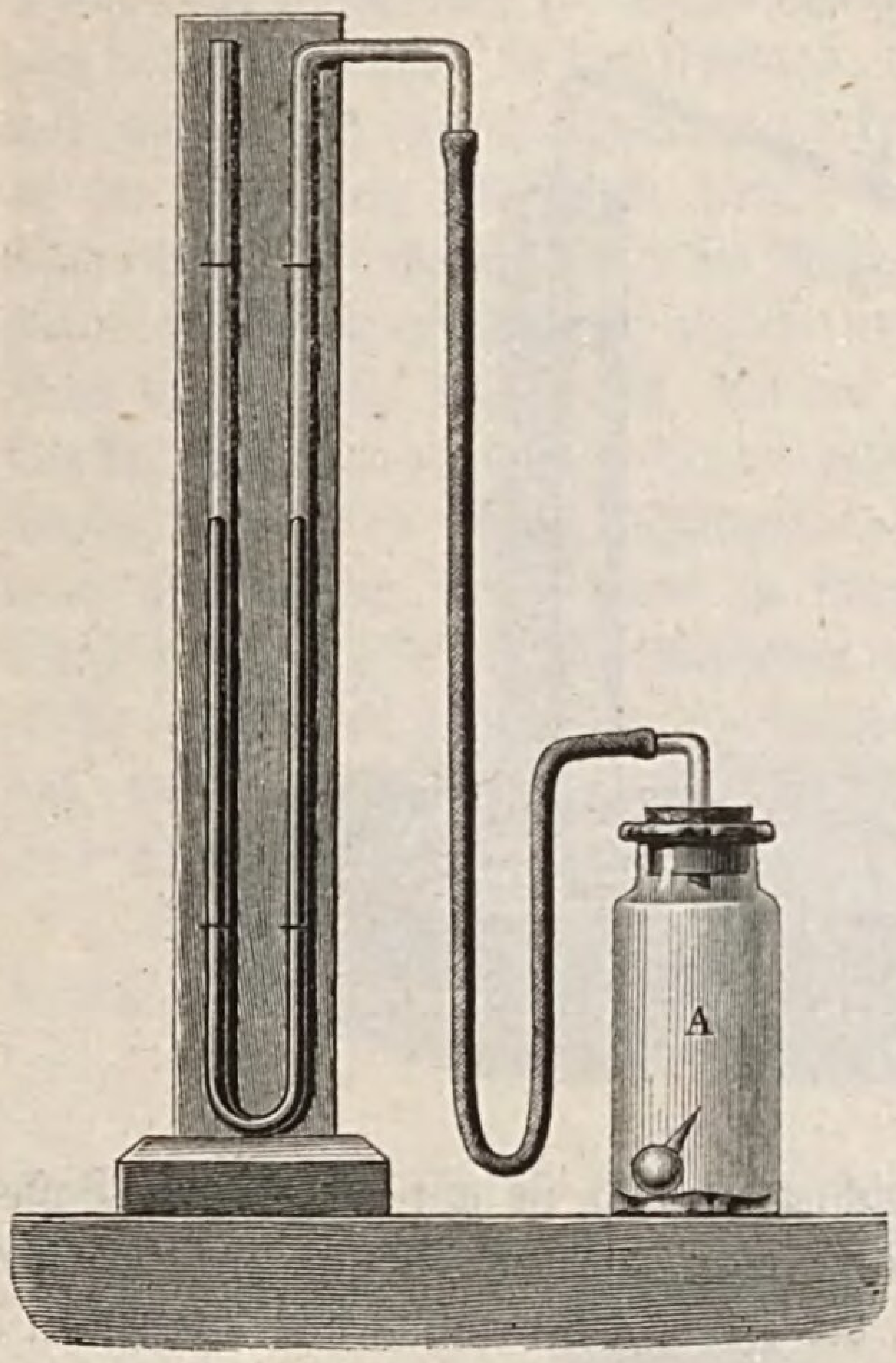
So wie der Schmelzpunkt nicht für alle Substanzen derselbe ist, so ist auch bei gleichem Drucke der Siedepunkt verschiedener Flüssigkeiten sehr ungleich. Um ihn zu bestimmen, kann man sich eines nach der Art der Fig. 556 (a. v. S.) zusammengesetzten Apparates bedienen. Die folgende Tabelle enthält die Siedepunkte mehrerer Flüssigkeiten für einen Barometerstand von 760 mm.

Kohlensäure	—	100°	C.
Cyangas	—	18	„
Schweflige Säure . .	—	10	„
Schwefeläther	+	37,8	„
Schwefelkohlenstoff . .		47,0	„
Alkohol		79,7	„
Wasser		100	„
Terpentinöl		157	„
Quecksilber		350	„

276 **Dämpfe im lufterfüllten Raum.** In einem lufterfüllten Raum nimmt der Dampf einer Flüssigkeit dieselbe Spannkraft an wie bei gleicher Temperatur in einem gleich großen luftleeren. Dieser wichtige Satz läßt sich am einfachsten mit dem in Fig. 557 dargestellten, von Babo konstruierten Apparate nachweisen. Eine mit Äther gefüllte dünnwandige Glaskugel (1 bis $1^1/_2$ cm Durchmesser), welche in einer feinen, nach der Füllung zugeschmolzenen Spitze ausläuft, wird in ein ungefähr 10 cm hohes Opodeldokglas A gebracht, dessen Hals mit einem wohlschließenden Kork verschlossen ist. Das Innere des Glases A ist durch ein kurzes in dem Kork steckendes Glasröhrchen und durch einen langen Kautschukschlauch mit einem Manometer in Verbindung gebracht. In den beiden Schenkeln des Manometers steht anfänglich das Quecksilber gleich hoch, weil die Luft in A gleiche Dichtigkeit mit der äußeren Luft hat. Sobald man aber durch heftiges Schütteln des Glases A (was wegen der Länge des Kautschukschlauches leicht ausführbar ist) das Glaskügelchen zerbricht, bilden sich alsbald Ätherdämpfe in A, deren Spannkraft noch zu der Spannkraft der in A enthaltenen Luft hinzukommt, wie man daraus sieht, daß das Quecksilber im inneren Schenkel des Manometers sinkt, im äußeren aber steigt. Die Höhendifferenz der beiden Quecksilberkuppen ist das Maß für die Spannkraft der Ätherdämpfe in A.

Das Sinken des Quecksilbers im einen und das Steigen im anderen Schenkel des Manometers findet aber nicht rasch, sondern ziemlich langsam statt; erst nach einigen Stunden hat die Höhe der manometrischen Quecksilbersäule ihr Maximum erreicht, und sie zeigt nun eine Spannkraft an, welche derjenigen des Ätherdampfes bei gleicher Temperatur im luftleeren Raume gleich ist; bei einer Temperatur von 20° wird dieser Spannungsüberschuß auf 434,8 mm steigen (Seite 517).

Fig. 557.



Aus dem allmählichen Steigen des Quecksilbers im Manometerrohre ergiebt sich aber, daß die Gegenwart der Luft in A die Bildung der Ätherdämpfe verzögert. Was hier von den Ätherdämpfen gesagt ist, gilt auch für andere, also auch für Wasserdämpfe.

Latente Wärme der Dämpfe. 277 Wenn eine Flüssigkeit verdampft, so verbraucht oder bindet sie Wärme, welche man Verdampfungswärme nennt. Die Verdampfungswärme ist für das Gefühl und für das Thermometer ebenso verschwunden wie die Wärme, welche beim Schmelzen gebunden wird.

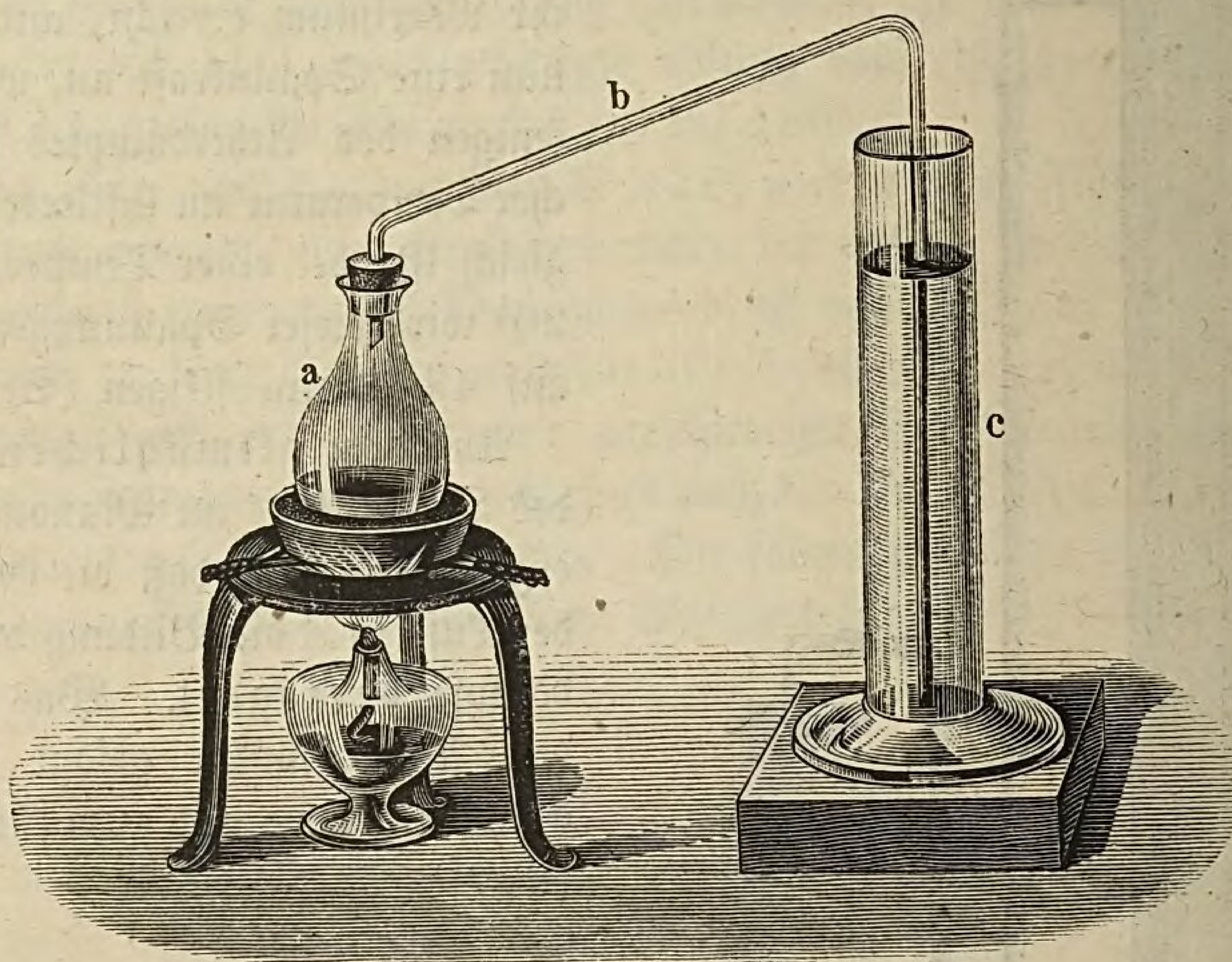
Daß bei der Dampfbildung Wärme gebunden wird, geht schon daraus hervor, daß die Temperatur einer Flüssigkeit während des Siedens unverändert bleibt. Die Temperatur des in einem offenen Gefäße siedenden Wassers bleibt 100°, wie sehr wir auch das Feuer verstärken mögen; alle Wärme, welche man dem siedenden Wasser zuführt, dient nur dazu, das Wasser von 100° in Dampf von 100° zu verwandeln.

Wie groß die latente Wärme des Wasserdampfes ist, d. h. welche Wärmemenge nötig ist, um 1 ccm Wasser zu verdampfen, kann man annähernd auf folgende Weise ermitteln.

In einem Glaskolben a, Fig. 558 (a. f. S.), wird Wasser mittels einer Weingeistlampe im Kochen erhalten und der dabei sich bildende Wasserdampf durch ein Glasrohr b in ein cylindrisches Gefäß c geleitet, welches mit kaltem Wasser gefüllt ist. Hier wird nun der Dampf wieder verdichtet: die Wärme also, welche bei der Bildung des Dampfes in a gebunden wurde, muß in c wieder frei werden, das kalte Wasser in c wird daher allmählich erwärmt, und aus der hier hervorgebrachten Temperaturerhöhung kann man auf die Größe der latenten Wärme des Dampfes schließen.

Nehmen wir an, das Kochen im Gefäße *a* habe schon einige Zeit gedauert, so daß alle Luft aus dem Gefäße ausgetrieben ist, und nun erst tauche man das Ende des gekrümmten Rohres in das kalte Wasser des Cylinders *c*, so

Fig. 558.



werden alle Dampfblasen alsbald verdichtet, sobald sie mit dem kalten Wasser in Berührung kommen. In dem Maße aber, als das Wasser in *c* wärmer wird, werden die Dampfblasen größer, bis endlich, wenn auch das Wasser in *c* zur Siedhitze erwärmt ist, die Dampfblasen unverdichtet durch die ganze Flüssigkeitsmasse aufsteigen, also in *c* selbst ein förmliches Kochen stattfindet. In dem Augenblicke, in welchem das Kochen in *c* beginnt, wird der Versuch unterbrochen, indem man das Gefäß *a* entfernt.

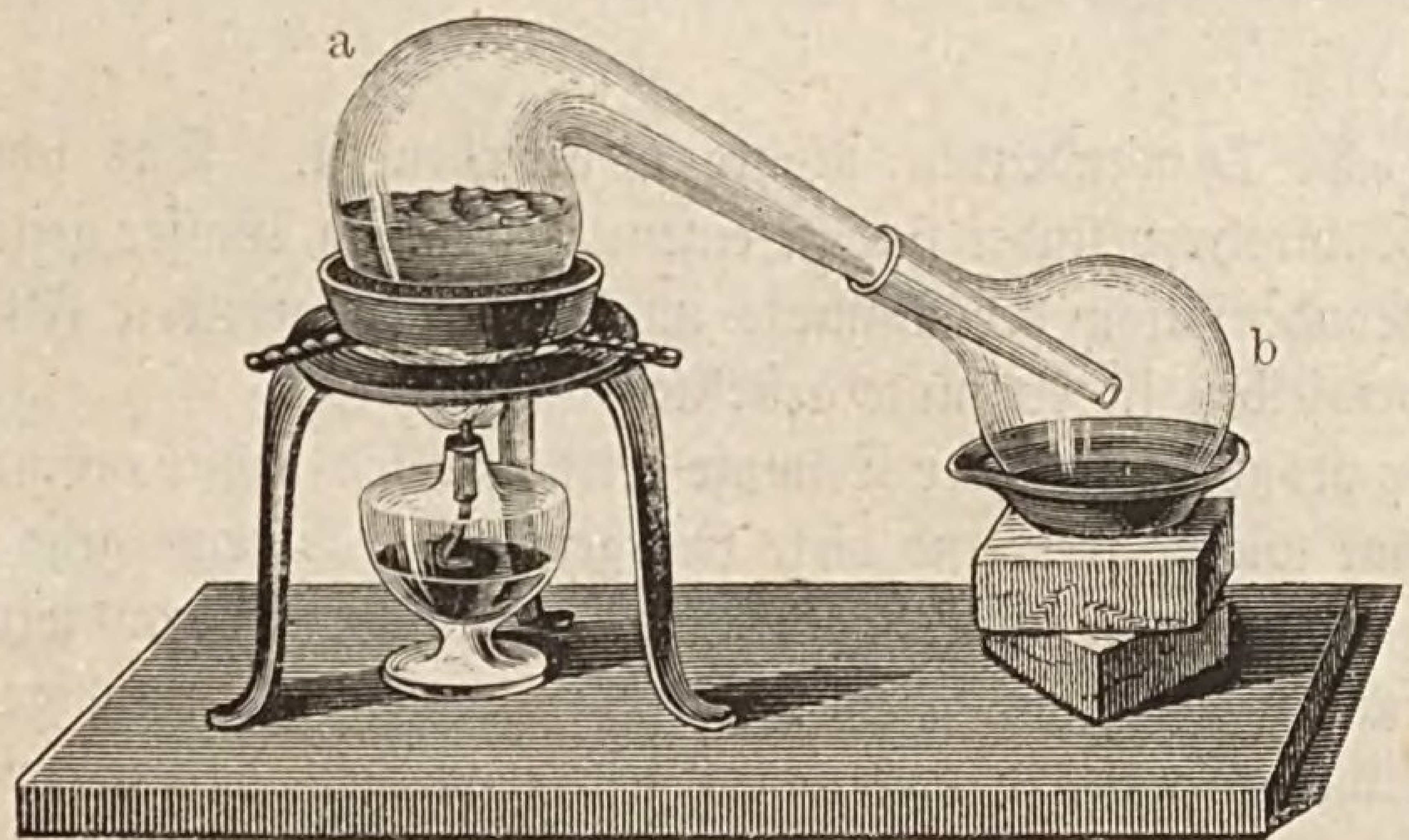
Gesetzt nun, in *c* hätten sich zu Anfange des Versuchs 200 ccm Wasser von 0° befunden, so wird der Cylinder *c* jetzt, nach Beendigung des Versuches, 240 ccm Wasser von 100° enthalten; es sind also 40 ccm Wasser hinzugekommen. Diese 40 ccm Wasser sind im Gefäße *a* verdampft und im Cylinder *c* verdichtet worden; die Wärme aber, welche von ihnen in *a* gebunden wurde, ist in *c* wieder frei geworden und hat hier die 200 ccm Wasser von 0° auf 100° erwärmt. Dieselbe Wärmemenge also, welche zur Verdampfung von 40 ccm Wasser verbraucht wird, reicht hin, um die Temperatur von 200 ccm Wasser, also von einer 5mal so großen Wassermasse, von 0° bis 100° zu erhöhen.

Wir haben oben angeführt, daß man als Einheit der Wärmemengen diejenige Wärmemenge annimmt, welche erforderlich ist, um die Temperatur von 1 g Wasser um 1° zu erhöhen. Demnach sind zur Erwärmung von 200 ccm von 0° auf 100° C. 20000 Wärmeeinheiten erforderlich; diese wurden durch Verdichtung von 40 g Wasserdampf frei; es beträgt somit die latente Wärme von 1 g Wasserdampf den vierzigsten Teil von 20000 oder 500.

Der eben angeführte Versuch ist zwar nicht geeignet, die latente Wärme des Wasserdampfes genau zu bestimmen, da er immer mehr oder weniger ungenaue Resultate giebt; dagegen eignet er sich sehr, den Zusammenhang der Sache recht anschaulich zu machen. Was die Resultate dieses Versuches besonders ungenau macht, ist der Umstand, daß bei der hohen Temperatur, zu welcher man das Wasser im Cylinder *c* erheben muß, ein bedeutender Wärmeverlust an die Umgebung stattfindet; ferner wird stets auch eine nicht unbedeutende Quantität Wasserdampf schon im Rohr *b* verdichtet, welche hier schon die frei werdende Wärme an die Luft abgiebt und als Wasser im Cylinder *c* ankommt. Man begreift also leicht, daß, bis das Wasser in *c* ins Kochen kommt, mehr Wasser aus dem Gefäße *a* herübergekommen sein wird, als es der Fall sein würde, wenn diese beiden Fehlerquellen nicht vorhanden wären; dieser Versuch wird also in der Regel einen zu kleinen Wert für die latente Wärme des Wasserdampfes geben. Die Methoden zur genaueren Bestimmung dieser Größe, welche jedoch hier nicht näher auseinandergesetzt werden können, haben ergeben, daß um 1 g Wasser von 100° C. in Dampf von 100° C. zu verwandeln 537 Wärmeeinheiten erforderlich sind.

Bei der D e s t i l l a t i o n werden die in irgend einem Gefäße durch Erwärmung gebildeten Dämpfe an einen Ort geleitet, welcher durch kaltes Wasser beständig abgekühlt wird, wodurch dann die Dämpfe wieder kondensiert, d. h. in tropfbare Flüssigkeit verwandelt werden.

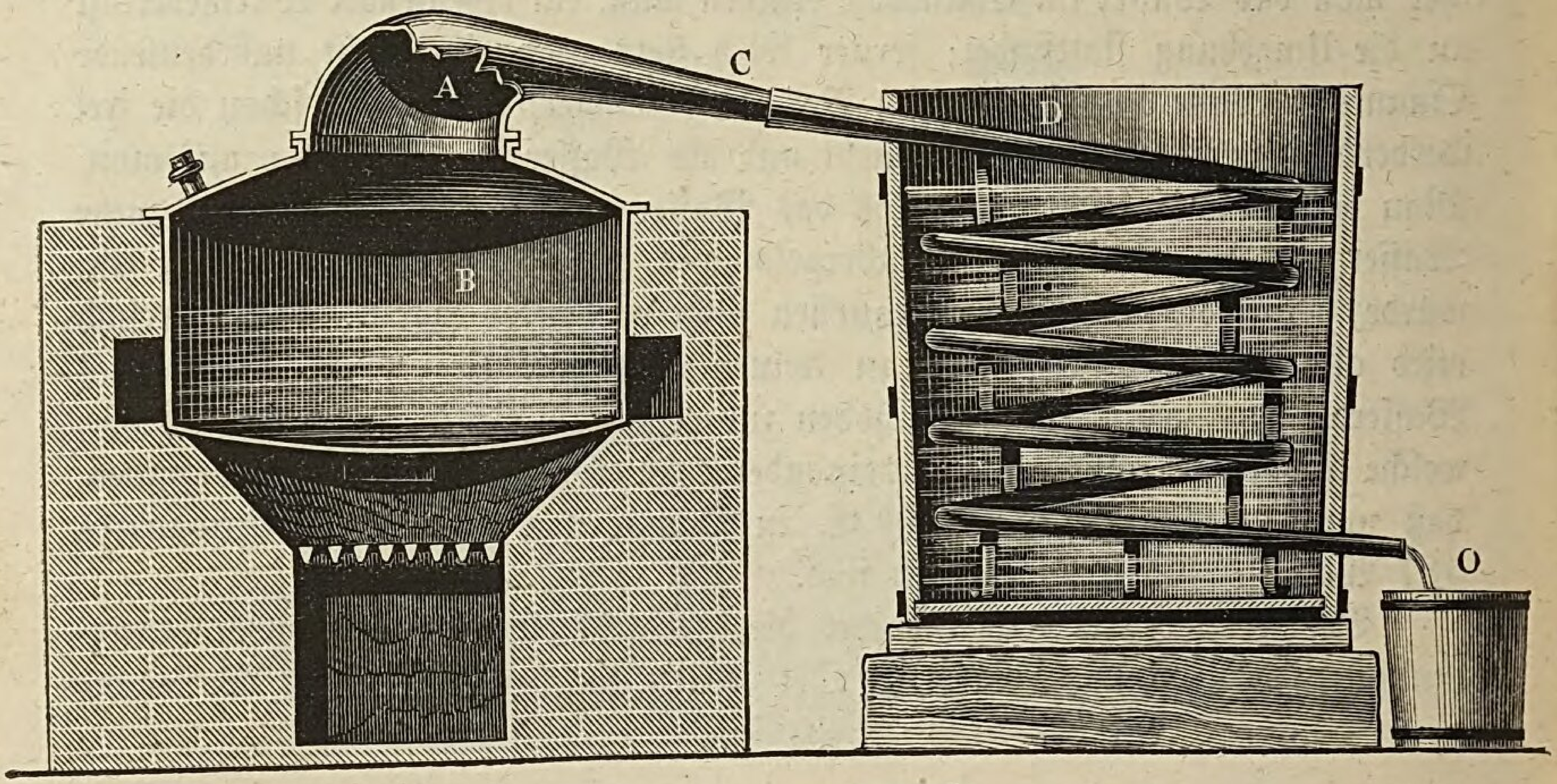
Fig. 559.



Eine der einfachsten Vorrichtungen zur Destillation ist die in Fig. 559 abgebildete. Die durch irgend welche fremde, weniger flüchtige Substanzen verunreinigte Flüssigkeit, welche durch Destillation gereinigt werden soll, wird in der Retorte *a* erwärmt, deren Hals in der Vorlage *b* steckt. Diese Vorlage wird dadurch kühl gehalten, daß sie in einer Schale mit kaltem Wasser liegt. Der besseren Abkühlung wegen wird auch Löschpapier oder ein Leinwandlappen auf die Vorlage gelegt und auf diesen fortwährend kaltes Wasser getröpfelt. Die in der Retorte *a* gebildeten Dämpfe werden teils schon in dem Halse der Retorte, teils in der Vorlage selbst verdichtet, in welcher sich die Flüssigkeit ansammelt.

Fig. 560 stellt einen Apparat dar, wie er zu Destillationen in größerem Maßstabe gebraucht wird. Das Gemisch, aus welchem eine Flüssigkeit durch Destillation gewonnen werden soll, befindet sich in der meist aus Kupferblech verfertigten Blase *B*. Auf dieser sitzt der Helm *A*, welcher mit einem in

Fig. 560.



das Kühlrohr *D* mündenden Rohre *C* versehen ist. Das schraubenförmig gewundene Kühlrohr befindet sich in einem mit kaltem Wasser gefüllten Bottich. Die durch Kondensation der Dämpfe im Kühlrohre gebildete Flüssigkeit fließt bei *O* aus demselben in ein untergestelltes Gefäß ab.

Bei der Kondensation der Dämpfe wird ihre bis dahin gebunden gewesene latente Wärme wieder frei, und diese frei gewordene Wärme geht in das Kühlwasser über, woher es kommt, daß dasselbe sehr schnell erwärmt wird. Weil aber die Kondensation der Dämpfe im Kühlrohre um so vollständiger erfolgt, je kälter das Kühlwasser ist, so muß dafür gesorgt werden, daß in dem Kühlbottich durch ein besonderes Rohr unten stets kaltes Wasser einströmt, während in gleichem Maße oben das bereits erwärmte Wasser abfließt.

Man könnte nun mit jedem Destillierapparate den Wert der latenten Wärme der Dämpfe bestimmen, wenn es möglich wäre, jederzeit genau zu ermitteln, wie viel Dampf in einer gegebenen Zeit verdichtet worden ist und wie viel Wärme er an das Kühlwasser abgegeben hat. Um die latente Wärme der Dämpfe genau zu bestimmen, hat man also nur einen Destillierapparat so einzurichten, daß sich diese Größen mit Genauigkeit ermitteln lassen. Nach diesem Principe ist in der That die latente Wärme der Dämpfe verschiedener Flüssigkeiten ermittelt worden. Es ist die latente Wärme für den Dampf von

Wasser	540
Alkohol	214
Schwefeläther . .	90,

d. h. um 1 g dieser Flüssigkeiten bei dem Drucke einer Atmosphäre in Dampf zu verwandeln, wird 540=, 214=, 90mal so viel Wärme gebunden, als nötig ist, um die Temperatur von 1 g Wasser um 1° zu erhöhen.

Die latente Wärme der Dämpfe ist nicht für alle Temperaturen dieselbe; sie ist größer für niedrige, geringer für hohe Temperaturen.

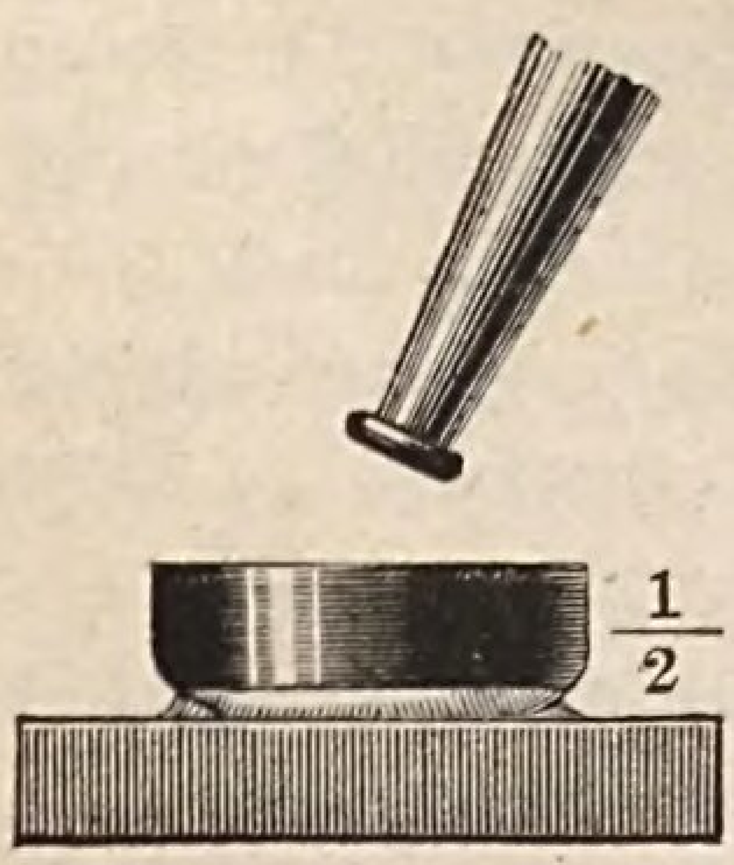
Erzeugung von Kälte durch Verdampfung. Wenn eine 278
Flüssigkeit an freier Luft kocht, so behält sie eine konstante Temperatur, weil sie von dem Feuer durch die Wände des Gefäßes stets so viel Wärme empfängt, als durch die Dampfbildung absorbiert wird. Wenn das Kochen aber unter dem Recipienten der Luftpumpe vor sich geht, so sinkt die Temperatur fortwährend, weil alsdann der Dampf die zu seiner Bildung nötige latente Wärme aus der Flüssigkeit selbst und aus den umgebenden Körpern nehmen muß.

Gießt man etwas Weingeist oder noch besser Schwefeläther auf die Hand, so fühlt man eine merkliche Erkaltung, weil die Flüssigkeit die zu ihrer Verdunstung nötige Wärme aus der Hand nimmt. — Wenn wir an heißen Tagen in Zugluft treten, so fühlen wir alsbald eine erfrischende Kühle. Es ist dies keineswegs die Folge davon, daß uns der Zug kalte Luft zuführt; die an uns vorüberstreichende Luft mag, wie wir uns durch das Thermometer überzeugen können, sehr warm sein, der Zug bringt uns doch diese Abkühlung, weil er eine lebhafte Verdunstung auf der Haut unterhält. — Wir haben das Gefühl einer drückenden Schwüle, wenn wir uns in einer mit Feuchtigkeit gesättigten windstillen Atmosphäre befinden, in welcher keine Verdunstung an unserem Körper stattfinden kann.

Wenn man die Kugel eines Thermometers mit Baumwolle umwickelt, dieselbe mit Schwefeläther befeuchtet und dann rasch das Thermometer hin und her schwenkt, so sinkt es noch einige Grade unter den Gefrierpunkt.

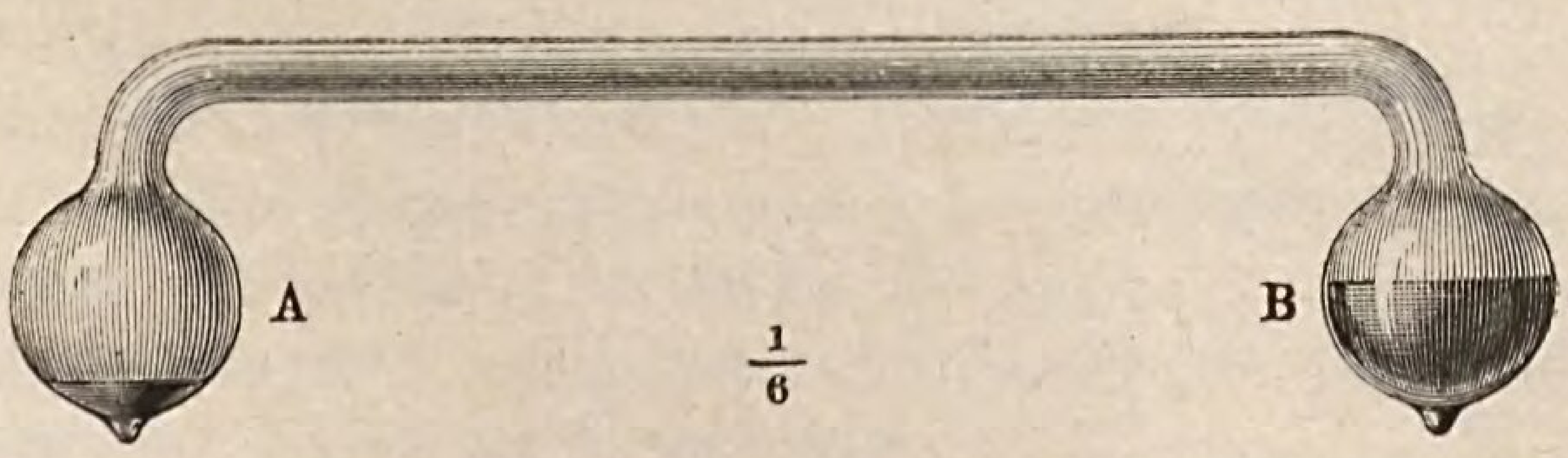
Unter den verschiedenen Methoden, durch rasche Verdampfung von Äther oder Schwefelkohlenstoff Wasser zum Gefrieren zu bringen, ist die folgende die einfachste: Man bringe einige Tropfen Wasser auf ein Brettchen, Fig. 561, setze darauf ein dünnwandiges Schälchen von Kupferblech und gieße etwas Äther oder Schwefelkohlenstoff hinein. Bewirkt man alsdann eine rasche Verdampfung dieser flüchtigen Flüssigkeit, etwa dadurch, daß man mit einem gewöhnlichen Blase=

Fig. 561.



1/2

Fig. 562.



1/6

balge darauf bläst, so gefriert alsbald das Wasser unter dem Schälchen, so daß dieses mit dem Brette nun fest zusammenhängt.

In Wollaston's Kryophor gefriert das Wasser durch seine eigene Verdampfung. Zwei Glaskugeln *A* und *B*, Fig. 562 (a. v. S.) sind durch eine möglichst weite Röhre verbunden. Aus dem Innern des Apparates, welcher eine entsprechende Menge Wasser enthält, muß alle Luft ausgetrieben sein, was dadurch erreicht wird, daß man das Wasser in der Kugel *B* in lebhaftem Kochen erhält, während die Dämpfe aus der feinen, noch nicht zugeschmolzenen Spitze von *A* entweichen. Nachdem das Kochen einige Zeit fortgedauert hat und dadurch alle Luft ausgetrieben worden ist, wird die feine Öffnung von *A* vor dem Lötrohre zugeblasen. Wenn man nun in dem so hergestellten Apparate alles Wasser in einer Kugel *B* zusammenlaufen läßt und dann die andere Kugel *A* in eine Kältemischung taucht, so wird durch die fortwährend in *A* erfolgende Verdichtung der Wasserdämpfe in der Kugel *B* eine so rasche Verdunstung hervorgerufen, daß das Wasser gefriert.

Die durch Verdampfung einer Flüssigkeit hervorgebrachte Temperaturerniedrigung ist um so bedeutender, je niedriger ihr Siedepunkt liegt und je größer die latente Wärme ihres Dampfes ist. Die bedeutendsten Temperaturerniedrigungen werden durch Verdampfen solcher Flüssigkeiten erzeugt, deren Siedepunkt noch unter 0° liegt; so kann man z. B. durch rasches Verdampfen von schwefliger Säure, deren Siedepunkt — 10° ist, selbst Quecksilber zum Gefrieren bringen. Die niedrigste Temperatur auf diesem Wege erhält man mit flüssiger Kohlensäure, deren Verhalten schon Seite 518 angegeben wurde.

Drittes Kapitel.

Specifische Wärme der Körper.

Begriff der specifischen Wärme. Wenn man 1 Pfund Wasser von 10^0 mit 1 Pfund Wasser von 60^0 rasch mischt, so wird die Mischung nahezu die mittlere Temperatur von 35^0 haben. Dieselbe Wärmemenge, welche das eine Pfund Wasser abgab, um von 60 auf 35^0, also um 25^0 zu erkalten, hat auch gerade hingereicht, um die Temperatur des anderen Pfundes Wasser um eben so viel Grade, nämlich von 10 auf 35^0, zu erhöhen. 279

Anders verhält sich die Sache, wenn wir 1 Pfund Wasser mit 1 Pfund irgend einer anderen Substanz mengen. Gießt man z. B. 1 Pfund Wasser von 10^0 und 1 Pfund Terpentinöl von 60^0 zusammen, so wird die wohl durch einander gerührte Mischung nur eine Temperatur von ungefähr 24^0 zeigen.

Die Wärmemenge, welche 1 Pfund Terpentinöl bei einer Temperaturerniedrigung von 36^0 C. abgegeben hat, genügte also nur, um die Temperatur von 1 Pfund Wasser um 14^0 C. zu erhöhen. Um also die Temperatur des Terpentinöls um eine bestimmte Anzahl von Graden zu erhöhen, bedarf es nur $\frac{14}{36}$ oder ungefähr 0,4 von der Wärmemenge, welche nötig ist, um in einer gleichen Masse Wasser die gleiche Temperaturerhöhung hervorzubringen.

Ähnlich verhält es sich mit anderen Stoffen. Um gleiche Massen Wasser und Quecksilber um gleich viel Grade zu erwärmen, bedarf man für Quecksilber nur 0,033 der Wärmemenge, welche für Wasser erforderlich ist. Um gleiche Temperaturerhöhung zu bewirken, muß man dem Wasser 30mal so viel Wärme zuführen, als einer gleichen Gewichtsmenge Quecksilber.

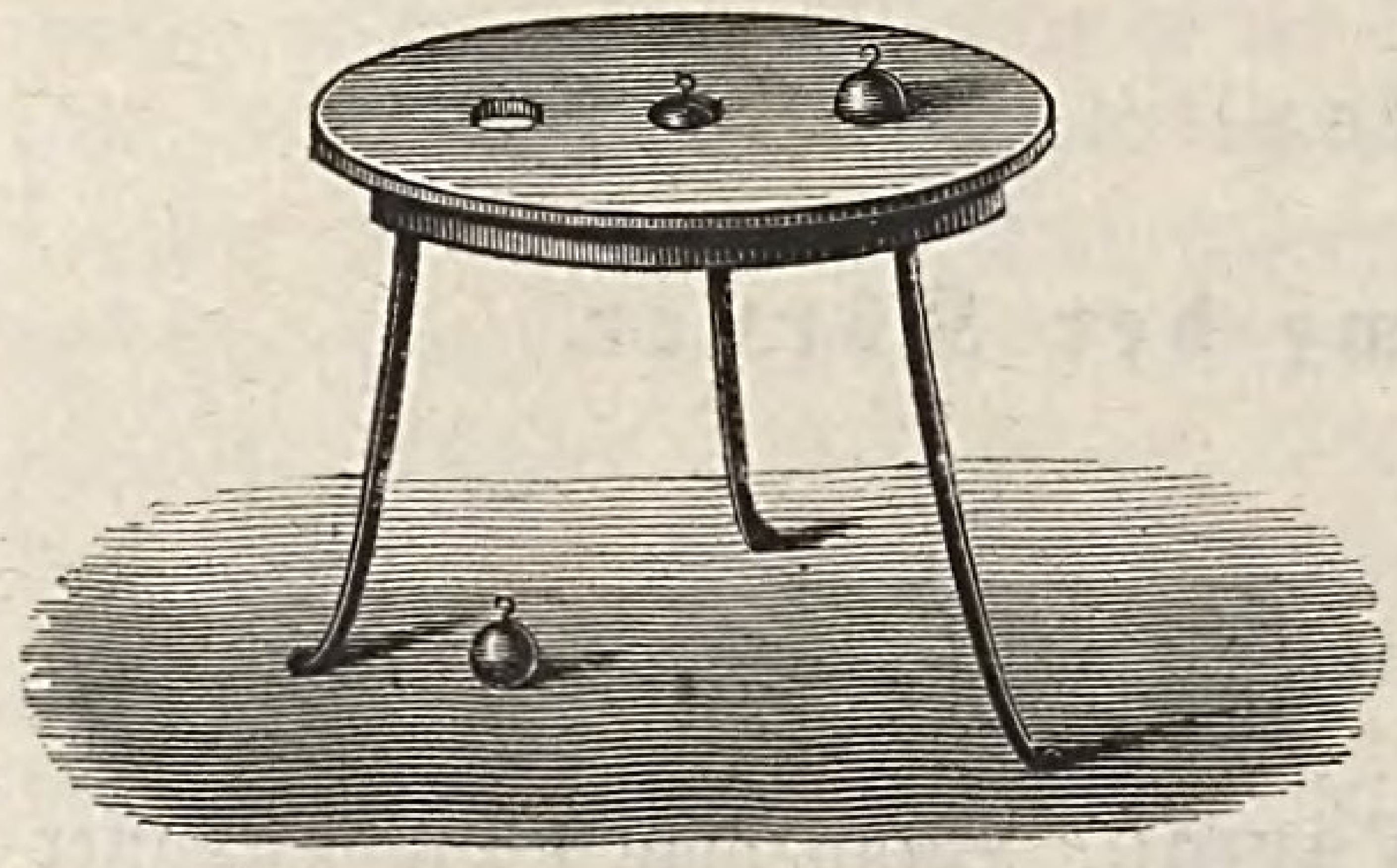
Die Anzahl der Wärmeeinheiten oder Calorien (Seite 504), welche nötig sind, um die Temperatur von 1 g eines Körpers um 1^0 C. zu erhöhen, nennt man seine specifische Wärme.

Den oben gemachten Angaben zufolge wäre also 0,033 die specifische Wärme des Quecksilbers und 0,4 die des Terpentinöls.

Gleichbedeutend mit „specifischer Wärme“ wird auch der Ausdruck Wärmecapacität gebraucht.

Ein Versuch, welcher sehr geeignet ist, die Ungleichheit der specifischen Wärme verschiedener Substanzen anschaulich zu machen, ist folgender: Auf eine Wachsscheibe von 12 bis 14 cm Durchmesser und 4 mm Dicke, welche von einem Metallring getragen ist, wie Fig. 563 zeigt, wird eine ungefähr 250 g schwere Kupferkugel und eine ebenso schwere Bleikugel gelegt, welche beide in einem mit kochendem Wasser gefüllten Gefäß gelegen haben. Die Kupferkugel wird in kurzer Zeit die Wachsplatte durchschmolzen haben und herabfallen, während die von der Bleikugel abgegebene Wärme die Wachsplatte nicht ganz zu durchschmelzen vermag.

Fig. 563.



Um den Wert der specifischen Wärme für verschiedene Körper zu ermitteln, hat man hauptsächlich drei Methoden in Anwendung gebracht, nämlich die der Eisschmelzung, die der Erkaltung und die der Mischung.

Nach der Methode des Eisschmelzens wird der Körper, dessen specifische Wärme bestimmt werden soll, gewogen, bis zu einer bestimmten Temperatur erwärmt und in ein mit Eisstücken gefülltes Gefäß gebracht. Indem er nun erkaltet, wird ein Teil des Eises geschmolzen; aus der Menge des geschmolzenen Eises ergiebt sich dann die Quantität der Wärme, welche der Körper verlor, und daraus dann auch seine specifische Wärme.

Die Erkaltungsmethode gründet sich auf folgendes Princip. Wenn ein erwärmter Körper in einen Raum gebracht wird, in welchem er nur durch Strahlung erkalten kann, so wird er unter übrigens gleichen Umständen um so langsamer erkalten, je größer seine specifische Wärme ist.

Die genauesten Resultate liefert die Mischungsmethode. Diese Methode besteht im wesentlichen darin, daß man eine gewogene Menge des zu untersuchenden Körpers bis auf eine bestimmte Temperatur erwärmt und dann in ein Gefäß mit Wasser eintaucht, dessen Temperatur durch Abkühlung jenes Körpers erhöht wird; kennt man die Quantität des Kühlwassers und hat man ermittelt, welche Temperaturerhöhung es durch die Abkühlung des eingetauchten Körpers erleidet, so läßt sich daraus die specifische Wärme des Körpers berechnen.

Wenn eine 200 g schwere, bis auf 100^0 erwärmte Platinkugel in eine 15^0 warme Wassermasse von 105 g eingetaucht wird, so findet man, daß nach vollständiger Ausgleichung sowohl die Temperatur des Wassers als die der Kugel 20^0 beträgt. Die Temperatur der Kugel ist also um 80^0 erniedrigt, die des Wassers um 5^0 erhöht worden. Die Wärmemenge, welche in diesem Falle dem Wasser zugeführt wurde, ist $105 . 5$ Wärmeeinheiten, und wenn wir mit s die Wärmemenge bezeichnen, welche nötig ist, um die Temperatur von 1 g Platin um 1^0 zu erhöhen, also auch die Wärmemenge, welche 1 g Platin bei einer Temperaturerniedrigung von 1^0 abgiebt, so ist die gesamte

Wärmemenge, welche die Platinkugel bei der obigen Operation abgegeben hat, 200 . 80 . s; wir haben also:

$$200.80.s = 105.5$$

oder

$$s = \frac{525}{16000} = 0,0328;$$

das Platin bedarf also, um eine gleiche Temperaturerhöhung zu erfahren, einer 0,0328mal so großen Wärmemenge als eine gleiche Gewichtsmenge Wasser, oder, mit anderen Worten, die specifische Wärme des Platins ist 0,0328.

Bezeichnen wir mit m das Gewicht und mit t die Temperaturerhöhung des Kühlwassers (in dem eben berechneten Beispiele 105 g und 5°), mit m' und t' das Gewicht und die Temperaturerniedrigung des abgekühlten Körpers (in unserem Beispiele 200 g Platin und 80°), so ergiebt sich aus der eben für einen konkreten Fall durchgeführten Betrachtungsweise für die Berechnung der specifischen Wärme s des abgekühlten Körpers folgende Formel:

$$s = \frac{m.t}{m' t'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

d. h.: man findet die specifische Wärme des abgekühlten Körpers, wenn man sein Gewicht mit seiner Temperaturerniedrigung multipliziert und mit diesem Produkte in das Produkt aus dem Gewichte des Kühlwassers mit seiner Temperaturerhöhung dividiert.

Resultate der Versuche über die specifische Wärme. 280

Die Bestimmung der specifischen Wärme erhielt durch die Arbeiten von Dulong und Petit (1819) eine große Wichtigkeit für die Chemie, indem sie fanden, daß das Produkt, welches man erhält, wenn man die specifische Wärme s eines starren Elementes mit seinem Atomgewichte p multipliziert, stets sehr nahe denselben Wert habe, wie man aus folgender Tabelle ersieht, in welcher die specifische Wärme und das Atomgewicht für einige feste Elemente zusammengestellt sind.

	Specifische Wärme s	Atomgewicht p	Atomwärme $p.s$
Eisen	0,114	56	6,37
Zink	0,095	65,2	6,23
Kupfer	0,095	63,4	6,02
Blei	0,031	207	6,50
Silber	0,057	108	6,16
Platin	0,032	197	6,40
Schwefel . . .	0,178	32	5,68
Jod	0,054	127	6,87

In der That sind die Zahlen der letzten Vertikalreihe dieser Tabelle sehr nahe gleich, und zwar ergiebt sich als Mittelwert

$$p \,.\, s = 6{,}3.$$

Bezeichnen wir das Produkt $p\,.\,s$ mit dem Namen der Atomwärme, so kann das Dulong-Petit'sche Gesetz auch so ausgedrückt werden:

Die Atomwärme aller festen Elemente ist nahezu dieselbe.

Dieses Gesetz, dessen Richtigkeit durch die Untersuchungen Regnault's (1840) außer Zweifel gestellt worden ist, macht es möglich, das Atomgewicht eines Körpers aus seiner specifischen Wärme wenigstens annähernd zu berechnen, also auch die auf anderem Wege gefundenen Werte des Atomgewichtes zu kontrolieren.

Für zusammengesetzte Körper gilt das Gesetz

$$MS = nps + n'p's',$$

wenn M das Molekulargewicht und S die specifische Wärme des zusammengesetzten Körpers, $ps, p's'$ u. s. w. die Atomwärme der einzelnen Elemente und endlich n und n' die Anzahl der Atome bezeichnet, welche in einem Molekül des Körpers enthalten sind. So besteht z. B. ein Molekül Kupferglanz aus zwei Atomen Kupfer (also $n = 2$) und einem Atom Schwefel; wir haben also für Kupferglanz

$$P\,.\,S = 2\,.\,6{,}02 + 5{,}68 = 17{,}72,$$

während der Versuch für Schwefelkupfer $PS = 19{,}1$ ergiebt.

Für die specifische Wärme einiger Flüssigkeiten fand Regnault folgende Werte:

Terpentinöl	0,423,
Alkohol, specif. Gew. 0,807	0,602,
Schwefelkohlenstoff	0,218.

281 **Specifische Wärme der Gase.** Für den Fall, daß die Gase bei der Erwärmung sich frei ausdehnen können, ihre Spannkraft also ungeändert bleibt, ergaben sich folgende Werte für die specifische Wärme einiger Gase:

Sauerstoff	0,218
Stickstoff	0,244
Wasserstoff	3,405
Chlor	0,121
Atmosphärische Luft	0,238
Kohlensäure	0,248
Wasserdampf	0,475
Ätherdampf	0,481.

Wenn aber ein Gas so eingeschlossen ist, daß es sich bei seiner Erwärmung nicht ausdehnen kann, daß also sein Volumen konstant bleibt, während

seine Spannkraft wächst, so ist seine specifische Wärme **geringer** als im vorigen Falle, d. h. um 1 g Gas um 1° zu erwärmen, ist weniger Wärme nötig, wenn es in einem Raume von unveränderlicher Größe eingeschlossen bleibt, als wenn es bei unverändertem Drucke sich ausdehnen kann. Bezeichnen wir mit s die specifische Wärme eines Gases bei konstantem Druck, mit s' seine specifische Wärme bei konstantem Volumen, so ist für atmosphärische Luft

$$\frac{s}{s'} = 1{,}41.$$

Damit steht auch im Zusammenhang, daß jede Verdünnung eines Gases von einer Wärmebindung begleitet ist und umgekehrt, daß Wärme frei werden muß, wenn man ein Gas komprimiert, wie dies namentlich durch das **pneumatische Feuerzeug** erläutert werden kann. Dieser Apparat besteht aus einer gläsernen oder messingenen unten geschlossenen Röhre, Fig. 564, in welcher sich ein aus Lederscheiben gebildeter, luftdicht anschließender Kolben leicht auf- und abschieben läßt. Das untere Ende des Kolbens ist etwas ausgehöhlt. Nachdem in diese Höhlung etwas Zunder eingelegt worden ist, wird der Kolben oben in das Rohr eingesteckt, dann durch einen kräftigen Schlag fast bis auf den Boden des Rohres hinabgetrieben und langsam wieder herausgezogen. Man findet nach dieser Operation, daß der Feuerschwamm in der Höhlung des Kolbens brennt; es muß also durch die starke Kompression der in der Röhre eingeschlossenen Luft eine bedeutende Menge Wärme frei geworden sein.

Fig. 564.



Die Ungleichheit der specifischen Wärme der Gase bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen findet ihre vollständige Erklärung durch die **mechanische Wärmetheorie**, deren Grundzüge in einem der folgenden Paragraphen besprochen werden.

Viertes Kapitel.

Fortpflanzung der Wärme.

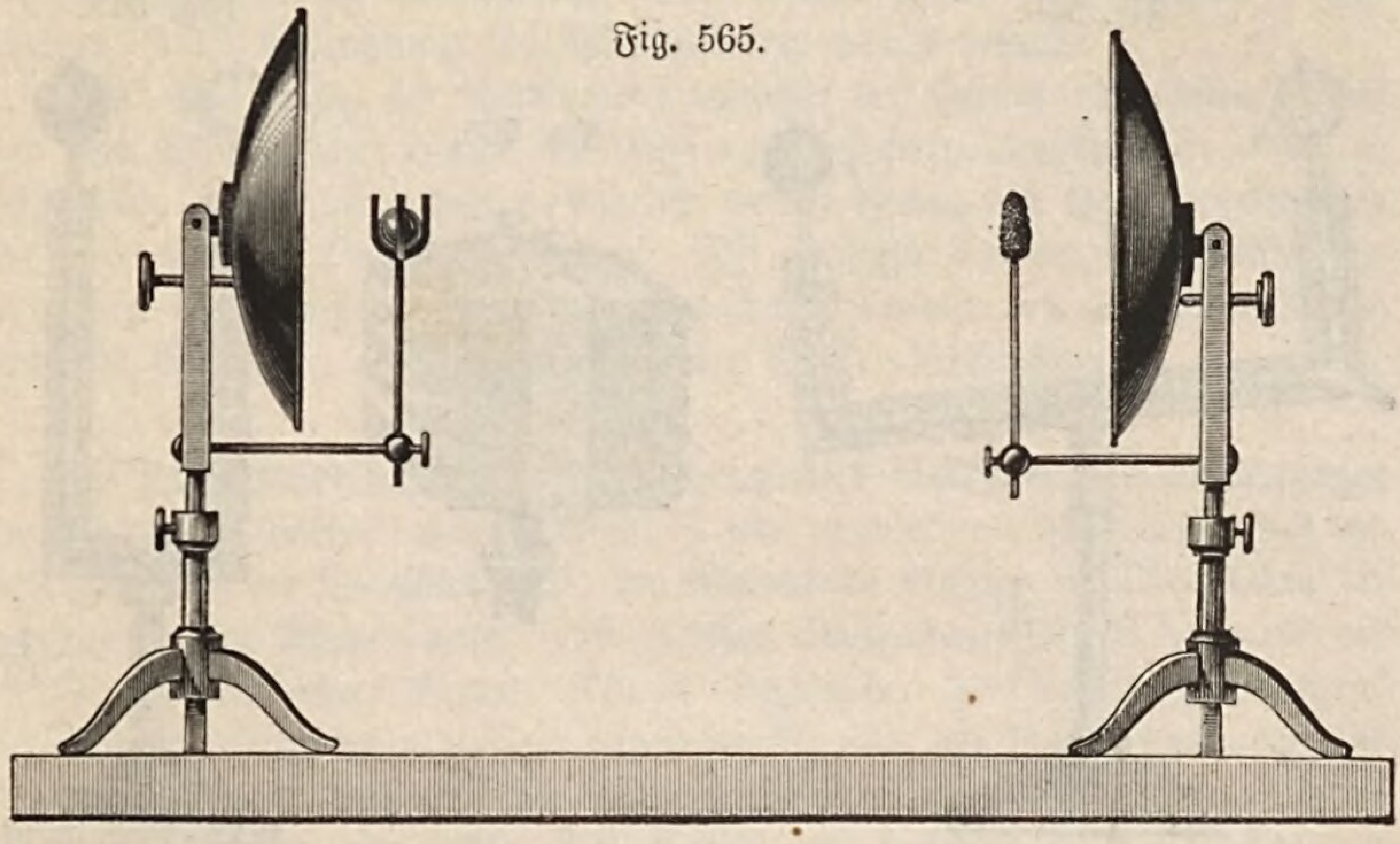
282 **Strahlende Wärme.** Zwischen allen Körpern findet ein fortwährender Austausch von Wärme statt, wodurch die Temperatur der wärmeren so lange abnimmt, die der kälteren aber so lange zunimmt, bis sie die gleiche Temperatur erlangt haben. Der Wärmeaustausch zwischen wärmeren und kälteren Körpern heißt Fortpflanzung der Wärme; derselbe kann auf drei Arten geschehen, nämlich: 1. durch Strahlung, 2. durch Leitung, 3. durch Strömung.

In der Nähe eines heißen Ofens oder eines Kohlenfeuers fühlt man eine bedeutende Erwärmung, welche sogleich wieder verschwindet, wenn zwischen die Wärmequelle und den Körper ein Schirm etwa von Pappe oder Metall gebracht wird. Die gleiche Erscheinung beobachtet man auch an der von der Sonne ausgehenden Wärme; dieselbe erwärmt die Erdoberfläche, ohne daß die Luft merklich erwärmt würde. Die Wärme kann sich also von einem Körper zu einem anderen fortpflanzen, ohne den zwischenliegenden Raum zu erwärmen, gleichwie das Licht sich durch Mittel hindurch fortpflanzen kann, ohne sie zu erleuchten. Man spricht deshalb von strahlender Wärme und von Wärmestrahlen, wie man von Licht und von Lichtstrahlen spricht.

Wenn man zwei große sphärische oder parabolische Hohlspiegel von poliertem Messingblech, Fig. 565, 5 bis 6 m von einander entfernt so aufstellt, daß die Achsen beider Spiegel in eine gerade Linie zusammenfallen, und alsdann in den Brennpunkt des einen Spiegels eine fast weißglühende Eisenkugel oder lebhaft glühende Kohlen, in den Brennpunkt des anderen aber ein Stück Zunder bringt, so wird sich der Zunder alsbald entzünden, gerade als ob er mit dem Feuer in unmittelbarer Berührung wäre. Dieser Versuch zeigt, daß der glühende Körper Wärmestrahlen aussendet, die sich wie Lichtstrahlen ausbreiten und im Brennpunkt des anderen Spiegels wieder gesammelt werden; denn es ist klar, daß der Zunder nicht etwa dadurch in Brand geriet, daß die zwischenliegenden Luft-

schichten allmählich bis zu seiner Entzündungstemperatur erhitzt worden sind. Bringt man den Zunder aus dem Brennpunkte weg, so wird er nicht mehr entzündet, wenn man ihn auch dem glühenden Körper weit näher bringt.

Fig. 565.



Bringt man an die Stelle der glühenden Kugel eine Kugel von 300° und an die Stelle des Zunders ein gewöhnliches Thermometer, so wird das Thermometer rasch steigen; die auf 300° erhitzte Kugel sendet also auch Wärmestrahlen aus.

Wenn man die 300° heiße Kugel mit einem Gefäße voll kochenden Wassers oder mit Wasser von 90°, 80° oder 70° vertauscht, so beobachtet man vielleicht keine Temperaturerhöhung mehr am Thermometer; dies beweist aber noch nicht, daß die Wände des Gefäßes bei dieser Temperatur keine Wärme mehr ausstrahlen, sondern nur, daß hier das gewöhnliche Thermometer nicht empfindlich genug ist. Man muß deshalb empfindlichere Instrumente zu Hülfe nehmen, etwa Rumford's oder Leslie's Differentialthermometer oder Melloni's Thermomultiplikator.

Rumford's Differentialthermometer, Fig. 566 (a. f. S.), besteht aus zwei Glaskugeln, *a* und *b*, welche durch eine gebogene Glasröhre verbunden sind, deren horizontaler Teil 3 bis 5 dm lang ist. In dieser Röhre befindet sich ein gefärbter Flüssigkeitsfaden, auf welchen von beiden Seiten her die Luft der Kugel drückt; er wird also nur dann an einer bestimmten Stelle stehen bleiben, wenn der Druck von beiden Seiten gleich ist. Wird die eine Kugel mehr erwärmt als die andere, so wird der Index gegen die kältere Kugel hingetrieben.

Leslie's Differentialthermometer, Fig. 567 (a. f. S.), ist auf ähnliche Weise konstruiert, nur sind seine Kugeln in der Regel etwas kleiner, die vertikalen Arme der sie verbindenden Röhre sind länger und stehen einander näher.

Melloni's **Thermomultiplikator** besteht aus einer thermo-elektrischen Säule, Fig. 568, wie sie schon früher beschrieben wurde, und aus einem sehr empfindlichen Multiplikator. Die Säule ist an beiden Enden sorgfältig mit

Fig. 566.

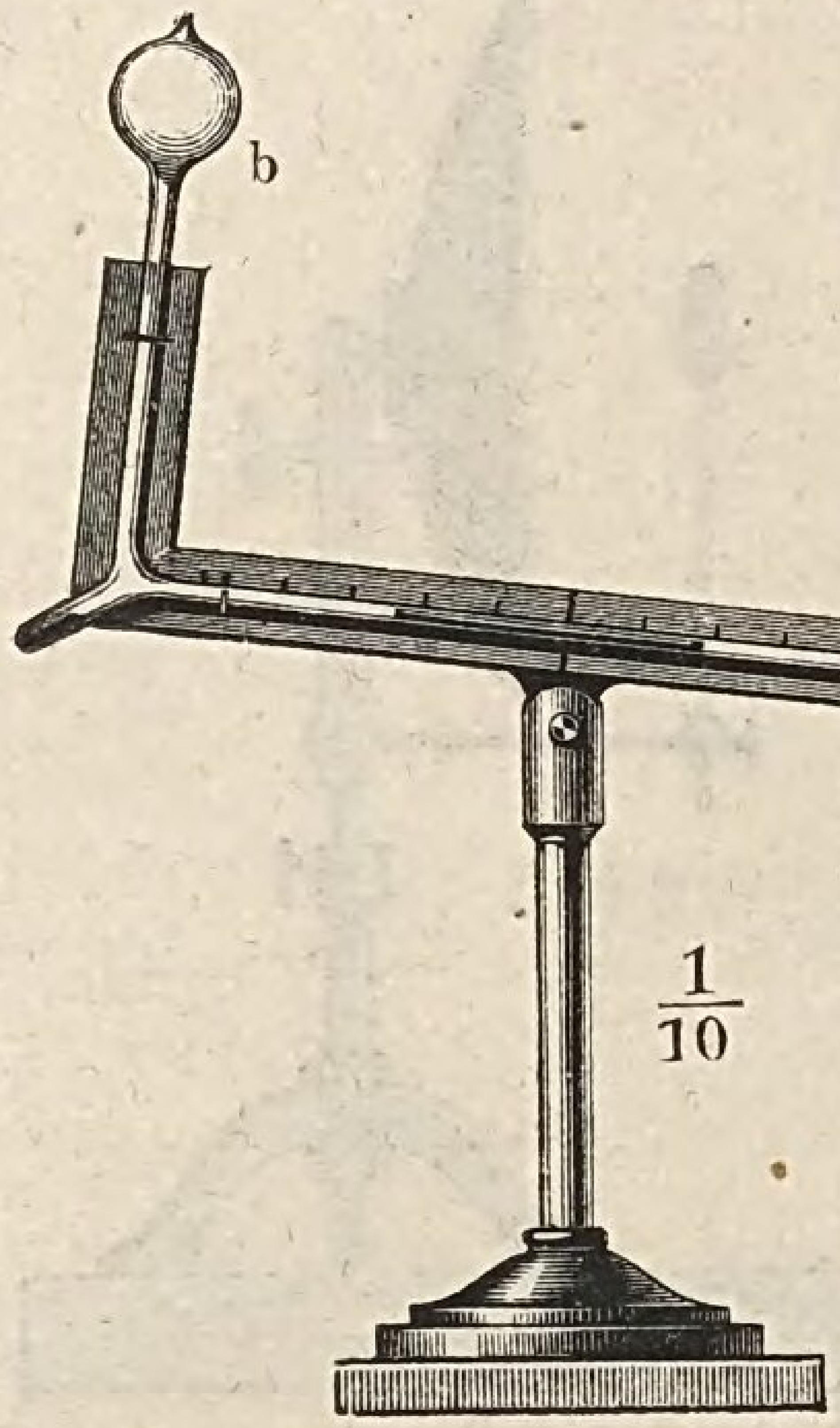


Fig. 568.

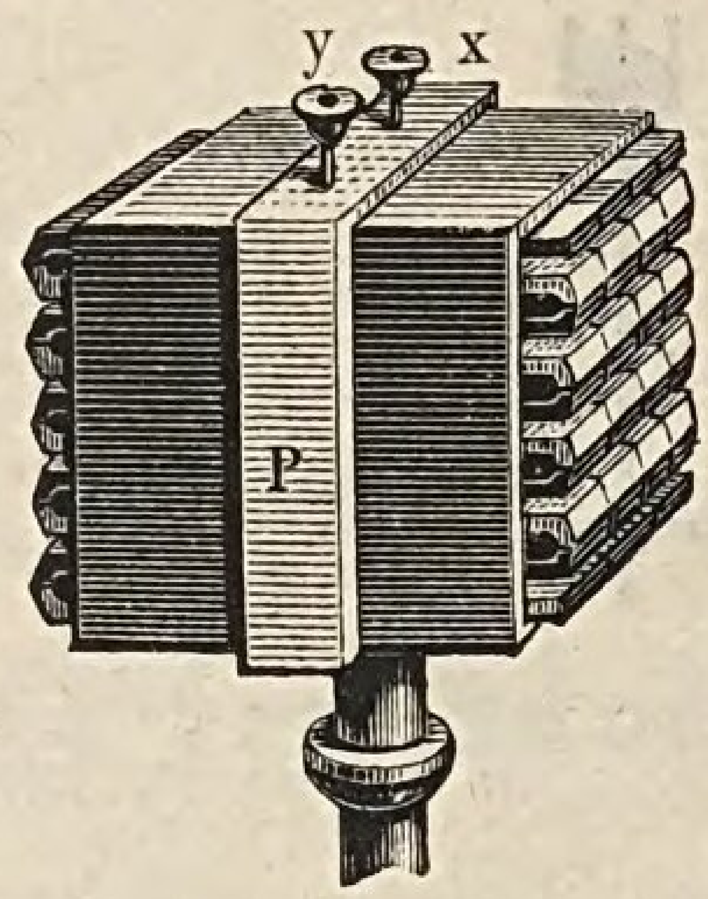


Fig. 567.

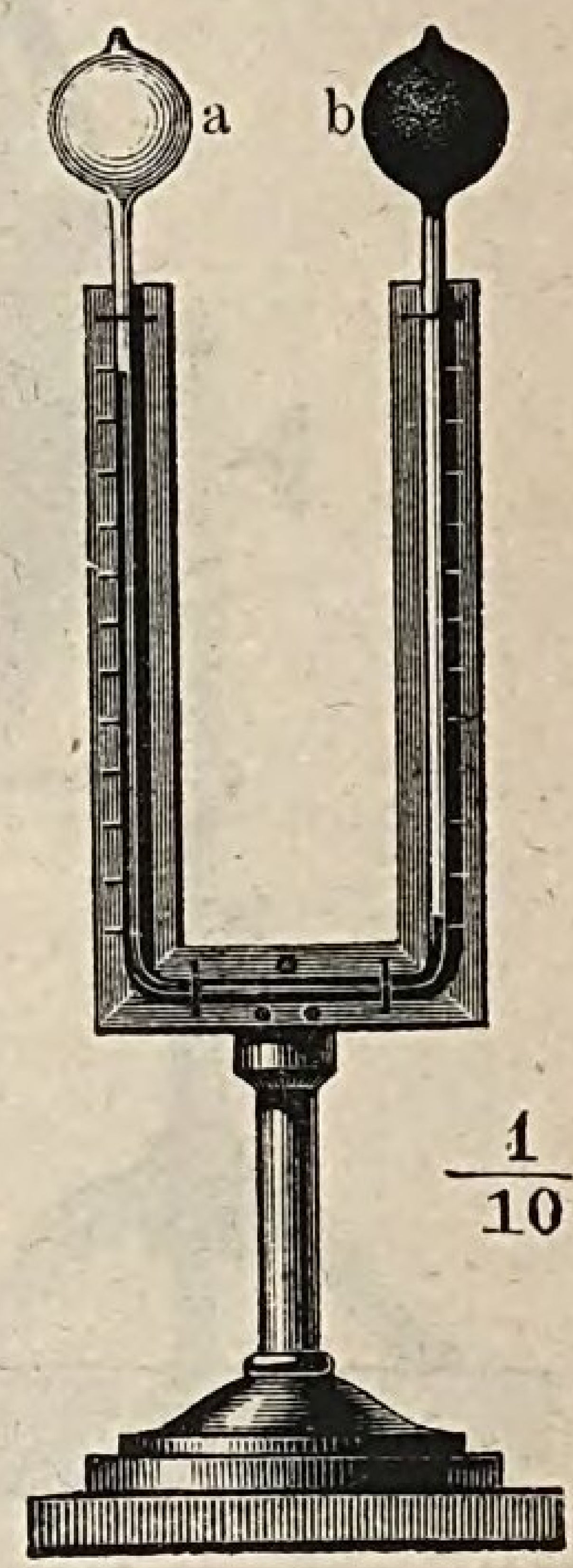
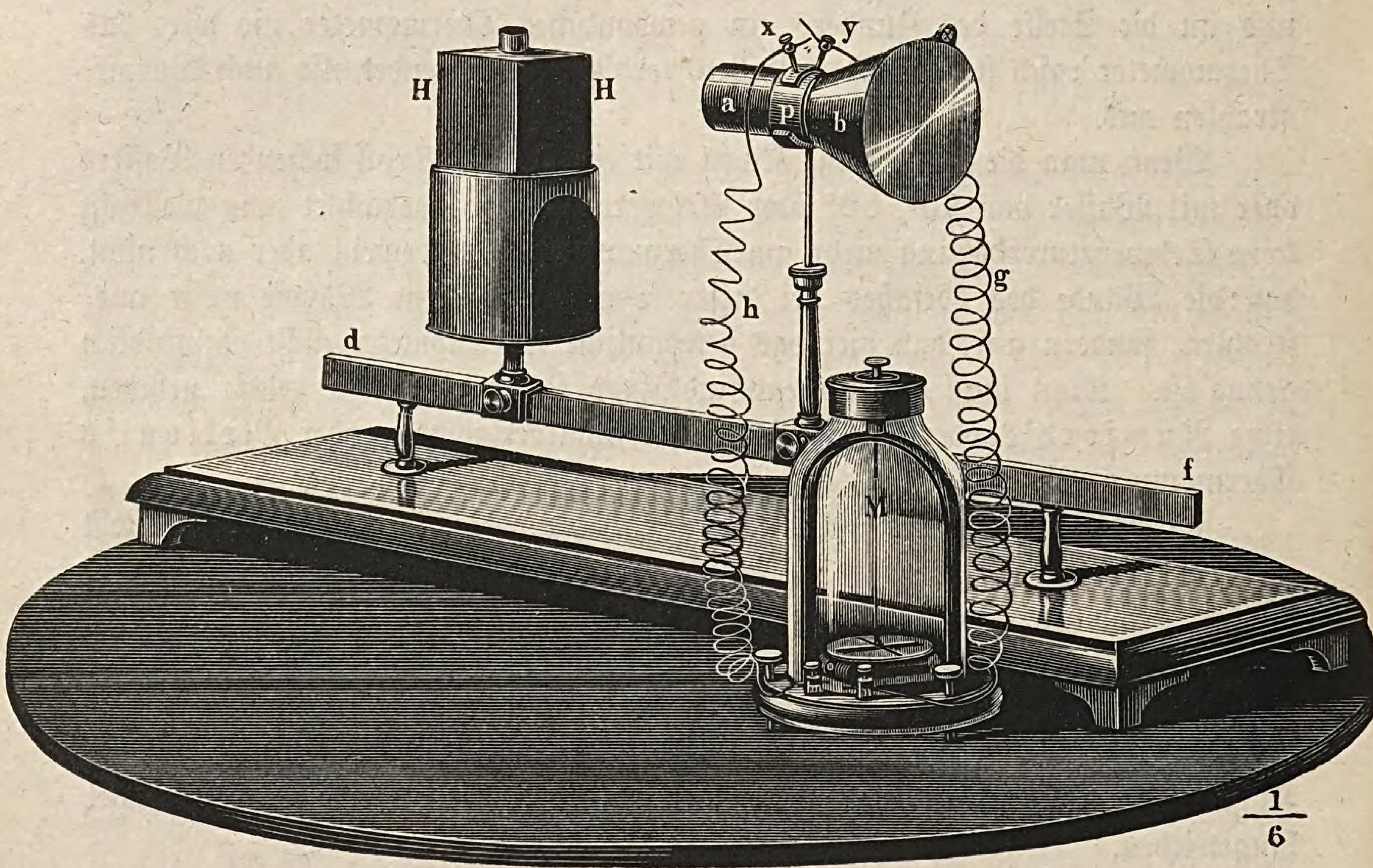


Fig. 569.



Ruß geschwärzt und mit ihrer Fassung *p*, Fig. 569, auf ein Stativ gebracht; die Hülsen *a* und *b* dienen dazu, die Luftströmungen und die Seitenstrahlungen von der Säule abzuhalten; die Hülse *b*, welche in unserer Figur

durch einen Deckel verschlossen erscheint, ist konisch und dient noch dazu, um nötigenfalls von dieser Seite her die Wärmestrahlen mehr zu konzentrieren. Der Kupferdraht, welcher das Galvanometer *M* bildet, ist 7 bis 8 m lang und ist mit ungefähr 40 Windungen auf einen Metallrahmen aufgewunden. Im übrigen ist die Einrichtung des Multiplikators bereits bekannt.

Zur Herstellung der Verbindung zwischen der thermo-elektrischen Säule und dem Multiplikator dienen die leicht ausdehnbaren Drahtspiralen *g* und *h*, Fig. 569, welche bei *x* und *y* mit den beiden Enden der thermo-elektrischen Säule in leitender Verbindung stehen. Die geringste Temperaturdifferenz zwischen den beiden geschwärzten Enden der Säule bewirkt nun schon eine Ablenkung der Nadel, die man auf dem geteilten Kreise ablesen kann.

Wärmestrahlungsvermögen der Körper. Das Vermögen 283
der Körper, die Wärme auszustrahlen, ist sehr ungleich und hängt wesentlich von dem Zustande der Oberflächen ab; im allgemeinen strahlen die Oberflächen der weniger dichten Körper unter sonst gleichen Umständen mehr Wärme aus als die Oberflächen dichter Körper. Um die Ungleichheit des Strahlungsvermögens verschiedener Oberflächen nachzuweisen, wendet man als Wärmequelle den aus Messingblech verfertigten Leslie'schen Hohlwürfel *H*, Fig. 569, von 15 bis 18 cm Seitenlänge an, dessen Seitenflächen auf verschiedene Weise präpariert sind. Während die eine rein metallisch und gut poliert ist, ist die zweite mit Ruß, die dritte mit Bleiweiß und die vierte mit Tusch überzogen.

Dieser Hohlwürfel wird etwa zur Hälfte mit heißem Wasser gefüllt, welches durch eine untergesetzte Weingeistlampe auf konstanter Temperatur erhalten wird. Je nachdem die eine oder die andere Seitenfläche der Thermosäule zugekehrt ist, sind die Ablenkungen der Nadel sehr ungleich; aus den beobachteten Ablenkungen ergiebt sich dann das Verhältnis, in welchem das Emissionsvermögen der verschiedenen Flächen zu einander steht. Auf diese Weise wurde das Ausstrahlungsvermögen folgender Körper bestimmt:

Kienruß	100	Tusch	85
Bleiweiß	100	Metallfläche . .	12

Wenn man also mit 100 das Ausstrahlungsvermögen des Kienrußes bezeichnet, so ist das Ausstrahlungsvermögen einer polierten Metallfläche gleich 12, also nur 12 Procent von dem der Kienrußfläche.

Absorption der Wärmestrahlen. Die Wärmestrahlen, welche 284
einen Körper treffen, können entweder

1) in seine Masse eindringen oder
2) an seiner Oberfläche zurückgeworfen werden.

Die in einen Körper eindringenden Strahlen können nun aber entweder von demselben absorbiert und in fühlbare Wärme verwandelt werden, oder sie können, ohne eine Erwärmung in demselben zu bewirken, durch denselben hindurchgehen, wie die Lichtstrahlen durch durchsichtige Körper.

Ein Beweis für die Absorption der Wärmestrahlen wird schon durch den auf Seite 549 besprochenen Versuch mit den Hohlspiegeln geliefert; die Temperaturerhöhung des in den Brennpunkt des einen Hohlspiegels gebrachten Körpers ist lediglich die Folge davon, daß er die auf ihm konzentrierten Strahlen absorbiert. Daß dies Absorptionsvermögen mehr oder weniger allen festen und flüssigen Körpern zukommt, geht daraus hervor, daß alle Körper, welche den Sonnenstrahlen ausgesetzt werden, eine Temperatur annehmen, die höher ist als die Temperatur der umgebenden Luft.

Das Absorptionsvermögen ist nicht für alle Körper gleich. Diese Ungleichheit läßt sich durch einen einfachen Versuch zeigen: Man setze nur ein Thermometer, dessen Kugel geschwärzt ist, den Sonnenstrahlen aus, so wird es weit höher steigen als ein anderes, dessen Kugel nicht geschwärzt ist; die geschwärzte Oberfläche der einen Thermometerkugel absorbiert also offenbar mehr Wärmestrahlen als die glänzende Oberfläche der anderen.

Die von einem Körper absorbierten Wärmestrahlen sind es also, welche ihn erwärmen. Wenn daher ein Körper durch Wärmestrahlung möglichst stark erwärmt werden soll, so muß man ihn mit einem Überzuge versehen, welcher die Wärmestrahlen stark absorbiert; man überzieht deshalb auch alle Thermoskope, welche dazu dienen sollen, die Wirkungen der Wärmestrahlen recht merklich zu machen, die Kugeln der Differentialthermometer, die beiden Enden der thermo-elektrischen Säule u. s. w. mit Ruß, weil dieser unter allen bekannten Körpern das stärkste Absorptionsvermögen hat.

Das Emissionsvermögen und das Absorptionsvermögen eines Körpers sind einander gleich. Dieser Satz geht daraus hervor, daß diejenigen Körper, welche, wie Ruß, Bleiweiß, die meisten Wärmestrahlen aussenden, sich auch am meisten erwärmen, wenn sie der Einwirkung der strahlenden Wärme ausgesetzt sind. Hieraus erklärt es sich auch, daß glänzende Metallflächen, die ja nur ein sehr geringes Emissionsvermögen besitzen, die Wärmestrahlen auch nur in einem sehr geringen Maße einzusaugen im Stande sind.

285 **Reflexion und Diffusion der Wärmestrahlen.** Diejenigen Wärmestrahlen, welche *nicht in die Masse eines Körpers eindringen* und also weder absorbiert noch durchgelassen werden, werden an seiner Oberfläche entweder *regelmäßig reflektiert*, oder *unregelmäßig zerstreut* oder *diffundiert*.

Die *Reflexion der Wärmestrahlen* erfolgt nach demselben Gesetze wie die der Lichtstrahlen, d. h. der Reflexionswinkel ist dem Einfallswinkel gleich; dies geht schon aus den Versuchen mit den Hohlspiegeln hervor, da ja die Brennpunkte für die Wärmestrahlen mit denen der Lichtstrahlen zusammenfallen.

Je vollständiger die Oberfläche eines Körpers die Wärmestrahlen reflektiert, desto weniger Strahlen kann er absorbieren.

Bei dem in Fig. 565 dargestellten Versuch wird der Feuerschwamm entzündet, weil die Oberfläche der Hohlspiegel den größten Teil der sie treffenden Wärmestrahlen regelmäßig reflektiert, weshalb denn auch die Hohlspiegel selbst

keine merkliche Temperaturerhöhung erfahren. — Wären dagegen die Hohlspiegel mit Ruß überzogen, so würden alle sie treffenden Strahlen absorbiert werden, alle Reflexion würde aufhören und der auf Seite 549 beschriebene Versuch würde nicht mehr gelingen.

Sowie an der Oberfläche eines nicht ganz vollständig polierten Körpers Lichtstrahlen nach allen Seiten unregelmäßig zerstreut werden, so erleiden auch die Wärmestrahlen an der Oberfläche der meisten Körper eine Diffusion. Man kann sich davon durch folgenden Versuch überzeugen. Man lasse durch eine Öffnung in dem Laden eines dunklen Zimmers Sonnenstrahlen auf eine der Öffnung gegenüberliegende Wand fallen, so wird der erleuchtete Fleck derselben, welcher von allen Seiten her sichtbar ist, weil er das Sonnenlicht nach allen Seiten hin zerstreut, auch die Wärmestrahlen unregelmäßig zerstreuen, also nach allen Seiten hin Wärmestrahlen aussenden, als ob er selbst eine Wärmequelle wäre. Diese Diffusion der Wärmestrahlen wird sichtbar, wenn man dem hellen Flecke die thermo-elektrische Säule zukehrt; man erhält einen Ausschlag der Nadel, an welcher Stelle des Zimmers man auch das Instrument aufstellen mag. Diese Wirkung kann also nicht von einer regelmäßigen Reflexion herrühren; daß sie aber auch nicht die Folge einer Erwärmung der von den Sonnenstrahlen beschienenen Stelle der Wand ist, geht daraus hervor, daß die Nadel auf der Stelle wieder auf den Nullpunkt der Teilung zurückgeht, sobald man die Öffnung im Laden verschließt.

Fähigkeit der Körper, Wärmestrahlen durchzulassen. 286

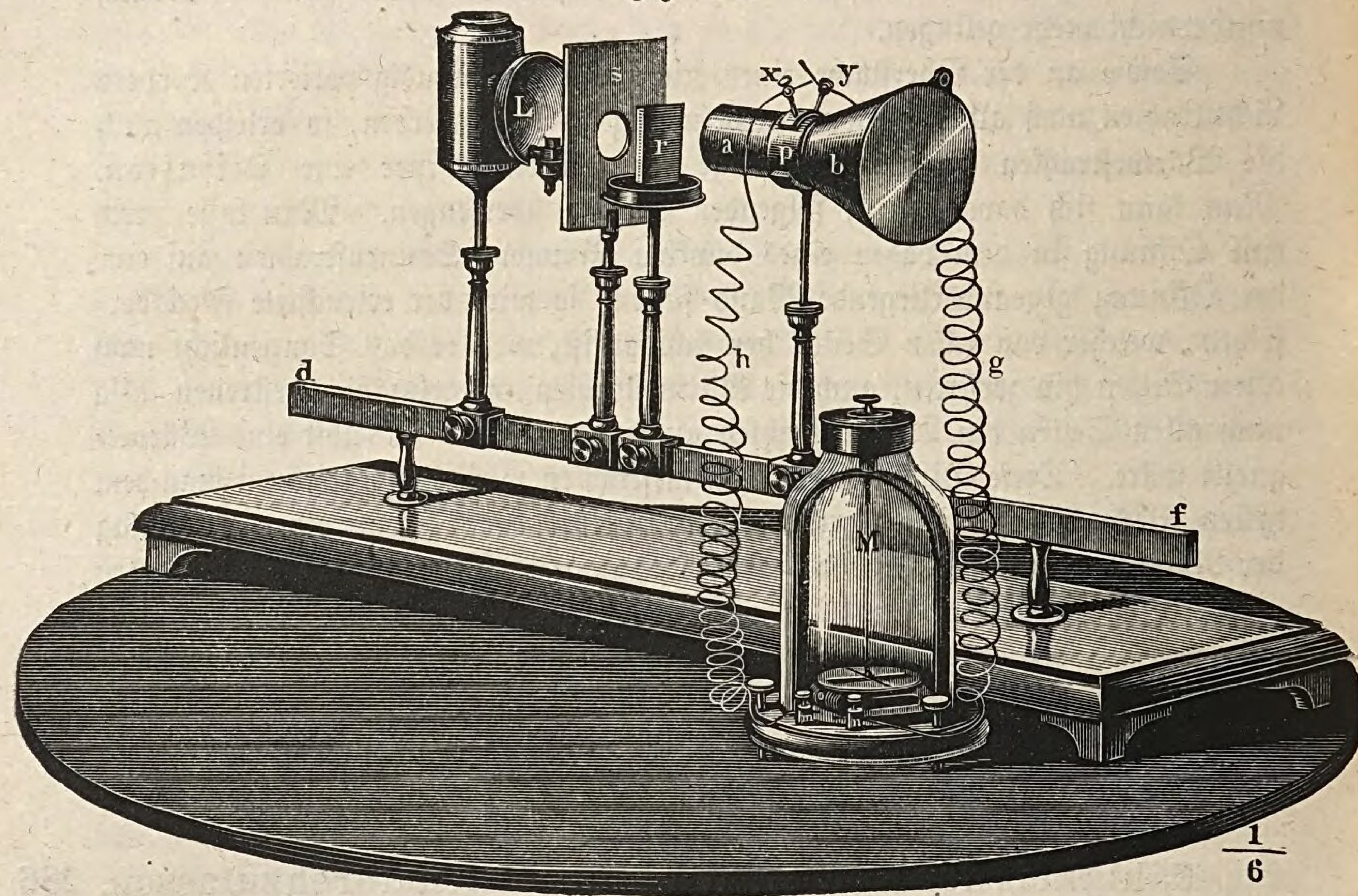
Daß feste Körper Wärmestrahlen in derselben Weise durchlassen können wie durchsichtige Körper die Lichtstrahlen, geht daraus hervor, daß man im Stande ist, brennbare Körper zu entzünden, wenn man sie in den Brennpunkt einer den Sonnenstrahlen ausgesetzten Linse hält. Genauere Untersuchungen darüber wurden erst durch die thermo-elektrische Säule möglich, und Melloni hat (1833) mit Hülfe derselben eine Reihe höchst wichtiger Resultate über den Durchgang der Wärmestrahlen durch verschiedene Körper erhalten.

Diejenigen Körper, welche die Wärmestrahlen nicht hindurchlassen, wie die undurchsichtigen Körper die Lichtstrahlen, bezeichnet Melloni als athermane; solche Körper hingegen, welche sich gegen die Wärmestrahlen verhalten wie die durchsichtigen Körper gegen die Lichtstrahlen, nennt er diatherman. Die Luft ist also ein sehr diathermaner Körper, und wir werden sogleich sehen, daß auch sehr viele feste und flüssige Körper, wenn auch in sehr ungleichem Maße, diatherman sind.

Die Versuche werden in folgender Weise angestellt. Die Wärmequelle, etwa eine kleine Öllampe, oder ein mit heißem Wasser gefüllter Hohlwürfel von Messingblech, an welchem eine Seite berußt ist, damit sie die Wärme besser ausstrahlt, wird so gestellt, daß das durch die Öffnung des Schirmes *s*, Fig 570 (a. f. S.), auf die Thermosäule fallende Strahlenbündel eine bestimmte Ablenkung der Nadel hervorbringt. Werden nun die Wärmestrahlen durch eine aus der Masse des zu untersuchenden Körpers hergestellte Platte *r* aufgefangen, so geht die

Nadel bald mehr, bald weniger zurück, und so ergiebt sich, daß gleich dicke und gleich durchsichtige Platten verschiedener Stoffe nicht gleiche Mengen strahlender

Fig. 570.



Wärme durchlassen. Bewirkt z. B. die freie Strahlung der Wärmequelle eine Ablenkung von 30°, so wird die Nadel auf 28° zurückgehen, wenn *r* aus einer 3 bis 4 mm dicken Steinsalzplatte besteht, während eine gleich dicke Quarzplatte die Nadel auf 15 bis 16° zurückgehen macht; das Steinsalz läßt also die Wärmestrahlen bei weitem besser durch als der Bergkrystall. Manche weniger durchsichtige Körper lassen sogar die Wärmestrahlen besser durch als andere, die ganz durchsichtig sind. Während z. B. eine ganz durchsichtige Alaunplatte die Ablenkung der Nadel von 30° auf 3 bis 4° reduziert, bringt eine noch weit dickere Platte von Rauchtopas die Nadel nur auf 14 bis 15° zurück. Ja manche fast ganz undurchsichtige Körper, wie schwarzes Glas und schwarzer Glimmer, lassen noch ziemlich viele Wärmestrahlen durch.

Läßt man die Wärmestrahlen, welche durch eine Glasplatte gegangen sind, auf eine Alaunplatte fallen, so werden sie gänzlich absorbiert, während doch eine Alaunplatte fast alle Wärmestrahlen durchläßt, welche zuvor durch eine Platte von Citronensäure gegangen sind. Diese Erscheinung hat die größte Ähnlichkeit mit dem Durchgange des Lichtes durch gefärbte Mittel; Lichtstrahlen, welche durch ein grünes Glas gegangen sind, werden bekanntlich von anderen grünen Gläsern leicht durchgelassen, sie werden aber absorbiert, wenn man sie auf ein rotes Glas fallen läßt; die Unterschiede zwischen den Wärmestrahlen sind also den Verschiedenheiten der Farben beim Lichte ganz analog.

Ähnliches hat man auch in Beziehung auf das Emissionsvermögen und Absorptionsvermögen der Körper beobachtet.

Die Wärmestrahlen sind brechbar wie die Lichtstrahlen, was sich am besten mit Hülfe eines Prismas von Steinsalz nachweisen läßt. Auch Polarisationserscheinungen hat man bei den Wärmestrahlen nachgewiesen.

Wärmeverhältnisse des Sonnenspektrums. Das Licht 287 der Sonne ist von chemischen und thermischen Effekten begleitet. Bereits oben auf Seite 346 wurde erwähnt, daß die blauen und violetten Strahlen des Spektrums die kräftigsten chemischen Wirkungen hervorbringen, ja daß sich die chemischen Effekte noch über die violette Grenze des Spektrums hinaus erstrecken; die chemischen Wirkungen des roten und gelben Lichtes sind dagegen sehr unbedeutend. Den Gegensatz zu diesem Verhältnisse zeigen die thermischen Wirkungen im Sonnenspektrum. Die wärmende Kraft der blauen und violetten Strahlen ist äußerst gering, die der roten und gelben dagegen sehr bedeutend. Wie die chemischen Wirkungen sich noch über die violette, so erstrecken sich auch die thermischen noch über die rote Grenze des Spektrums hinaus, d. h. es giebt Strahlen, welche weniger brechbar sind als die roten und vom Auge nicht wahrgenommen werden können, welche aber doch erwärmende Eigenschaften haben, und welche wir als dunkle Wärmestrahlen bezeichnen. Die Wärmestrahlen, welche ein geheizter eiserner Ofen ausstrahlt, sind solche dunkle Wärmestrahlen; ihre Vibrationsgeschwindigkeit ist dem Gesagten zufolge noch geringer, ihre Wellenlänge also noch größer als die der äußersten roten Strahlen.

In dem Spektrum eines Steinsalzprismas liegt das Maximum des Wärmeeffektes nicht im sichtbaren Teile, sondern in der ultraroten Verlängerung.

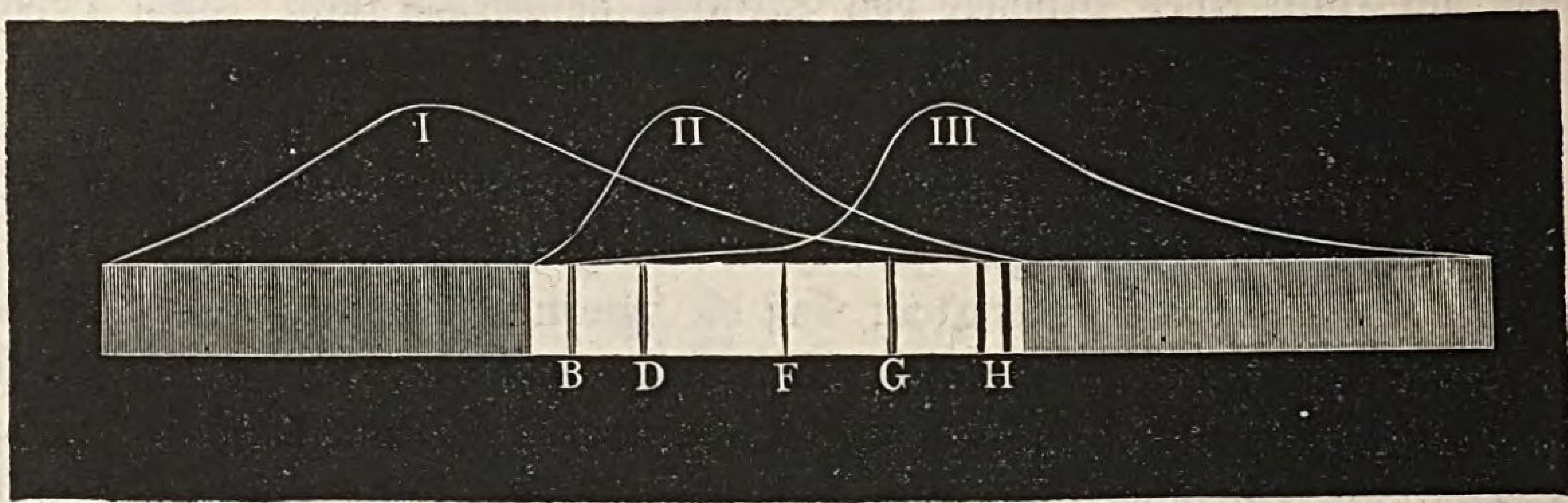
Die leuchtenden Wärmestrahlen werden von allen farblos-durchsichtigen Körpern, also z. B. von Steinsalz, Quarz, Alaun, Glas u. s. w., ganz gleich gut durchgelassen; die ungleiche Wärmedurchlassung dieser Stoffe, welche im vorigen Paragraphen besprochen wurde, kann also nur in einem ungleichen Verhalten derselben gegen dunkle Wärmestrahlen ihren Grund haben. Schwarzes Glas und schwarzer Glimmer lassen noch dunkle Wärmestrahlen durch, während sie alle leuchtenden Wärmestrahlen absorbieren.

In Fig. 571 (a. f. S.) stellt die Kurve I die Intensitätsverhältnisse des Wärmespektrums, II die des Lichtspektrums und III die des chemischen Spektrums dar. Man ersieht aus dieser Figur, wie das Maximum des thermischen Effektes noch jenseits der roten Grenze des sichtbaren Spektrums liegt. Die größte Lichtstärke des Spektrums findet sich im Gelb, in der Nähe der Fraunhofer'schen Linie *D*. Das Maximum des chemischen Effektes endlich liegt im Indigo, zwischen den Fraunhofer'schen Linien *G* und *H*.

Während die Wellenlänge der violetten Strahlen ungefähr 0,0004 mm, die der äußersten roten ungefähr 0,0007 mm beträgt, ist nach Esselbach's Messungen die Wellenlänge der äußersten chemischen Strahlen 0,0003 mm,

und nach J. Müller's Versuchen die Wellenlänge der äußersten dunklen Wärmestrahlen 0,0018 mm.

Fig. 571.



Die Gesamtheit der Sonnenstrahlen umfaßt demnach nahezu $2^1/_2$ Oktaven, von welchen nicht ganz eine Oktave von 0,0004 bis 0,0007 mm Wellenlänge auf das sichtbare Spektrum fällt.

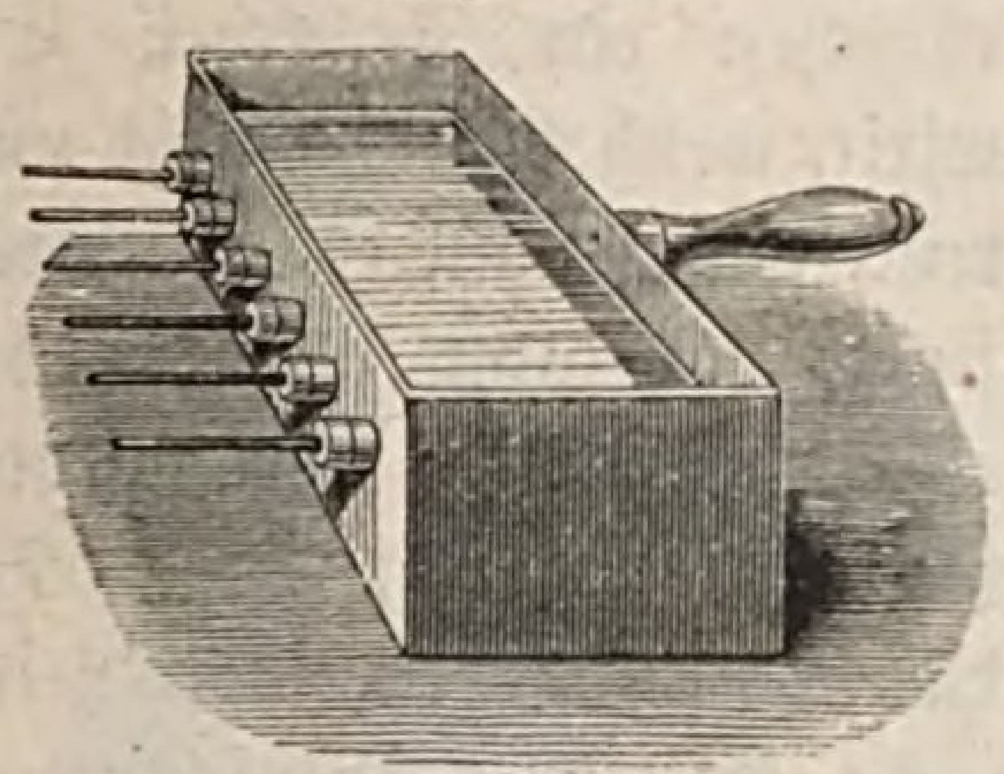
288 **Verbreitung der Wärme durch Leitung.** Wird ein Metallstab an dem einen Ende erhitzt, so werden alle Teile desselben nach und nach erwärmt, so daß nach einiger Zeit auch das andere Ende eine Temperaturerhöhung annimmt. Die Wärme kann sich also von einer Stelle eines Körpers nach einer anderen auch so fortpflanzen, daß alle zwischenliegenden Stellen erwärmt werden. Diese Art der Wärmefortpflanzung wird Wärmeleitung und die durch Wärmeleitung fortgepflanzte Wärme geleitete Wärme genannt.

Ein Kupferdraht und ein Glasstab, welche mit dem einen Ende in eine Flamme gehalten werden, zeigen ungleiche Wärmeleitung. Der Kupferdraht wird auf eine beträchtliche Strecke so stark erhitzt, daß man ihn innerhalb derselben, ohne sich zu beschädigen, nicht berühren kann, während sich der Glasstab in kleiner Entfernung von der Flamme, ohne eine besondere Wärmeempfindung hervorzubringen, anfassen läßt. Hiernach sind im allgemeinen die Entfernungen von der Erwärmungsstelle, in denen die Körper durch Leitung auf gleiche Temperatur gebracht werden, verschieden; je nachdem diese Entfernungen groß oder klein sind, bezeichnet man die Körper als gute, oder als schlechte Wärmeleiter. Zu den ersteren gehören sämtliche Metalle, zu den letzteren Glas, Porcellan, Stein, Holz, Kohle, die organischen Stoffe, insbesondere aber alle lockeren, fein zerteilten Körper, wie Wolle, Haare, Federn, Asche, ferner sämtliche Flüssigkeiten, mit Ausnahme des Quecksilbers, sowie die Gase und die Dämpfe.

Von der ungleichen Wärmeleitung hängt auch das verschiedene Gefühl ab, welches man bei der Berührung verschiedener Körper von derselben Temperatur empfindet. Gute Wärmeleiter, welche wärmer sind als unser Körper, teilen diesem mehr Wärme mit und entziehen demselben, wenn sie kälter sind, mehr Wärme als schlechte Wärmeleiter; daher fühlen sich jene im ersten Falle wärmer, im zweiten Falle kälter an als diese.

Um zu zeigen, wie ungleich die Fähigkeit verschiedener Körper ist, die Wärme fortzuleiten, kann man den in Fig. 572 dargestellten, von Ingenhouß angegebenen Apparat anwenden. In die eine Seitenwand eines Kastens von Blech sind mehrere, aus den zu vergleichenden Substanzen verfertigte Stäbchen eingesteckt, welche sämtlich gleichen Durchmesser haben und mit einer Schicht von Wachs überzogen sind; wenn man nun kochendes Wasser oder heißes Öl in den Kasten gießt, so wird die Wärme auch mehr oder weniger weit in die Stäbchen vordringen und den Wachsüberzug schmelzen. Nehmen wir an, das eine Stäbchen sei von Kupfer, das andere von Eisen, das dritte von Blei, das vierte von Glas, das letzte von Holz, so wird die Wachsschicht des Kupferstäbchens schon vollständig bis ans Ende geschmolzen sein, während bei allen anderen Stäbchen die Schmelzung des Wachses noch nicht so weit vorgeschritten ist; das Kupfer ist also unter diesen fünf Körpern der beste Wärmeleiter. Für das Eisenstäbchen schreitet die Schmelzung des Wachses rascher voran als für das Bleistäbchen, und während das Wachs auf dem Kupferstabe ganz weggeschmolzen ist, ist die Wachsschicht auf dem Glasstabe nur auf eine sehr unbedeutende Strecke geschmolzen, an dem Holzstäbchen ist aber kaum ein Anfang des Schmelzens wahrzunehmen, das Holz ist also in der That unter diesen Körpern der schlechteste Wärmeleiter.

Fig. 572.



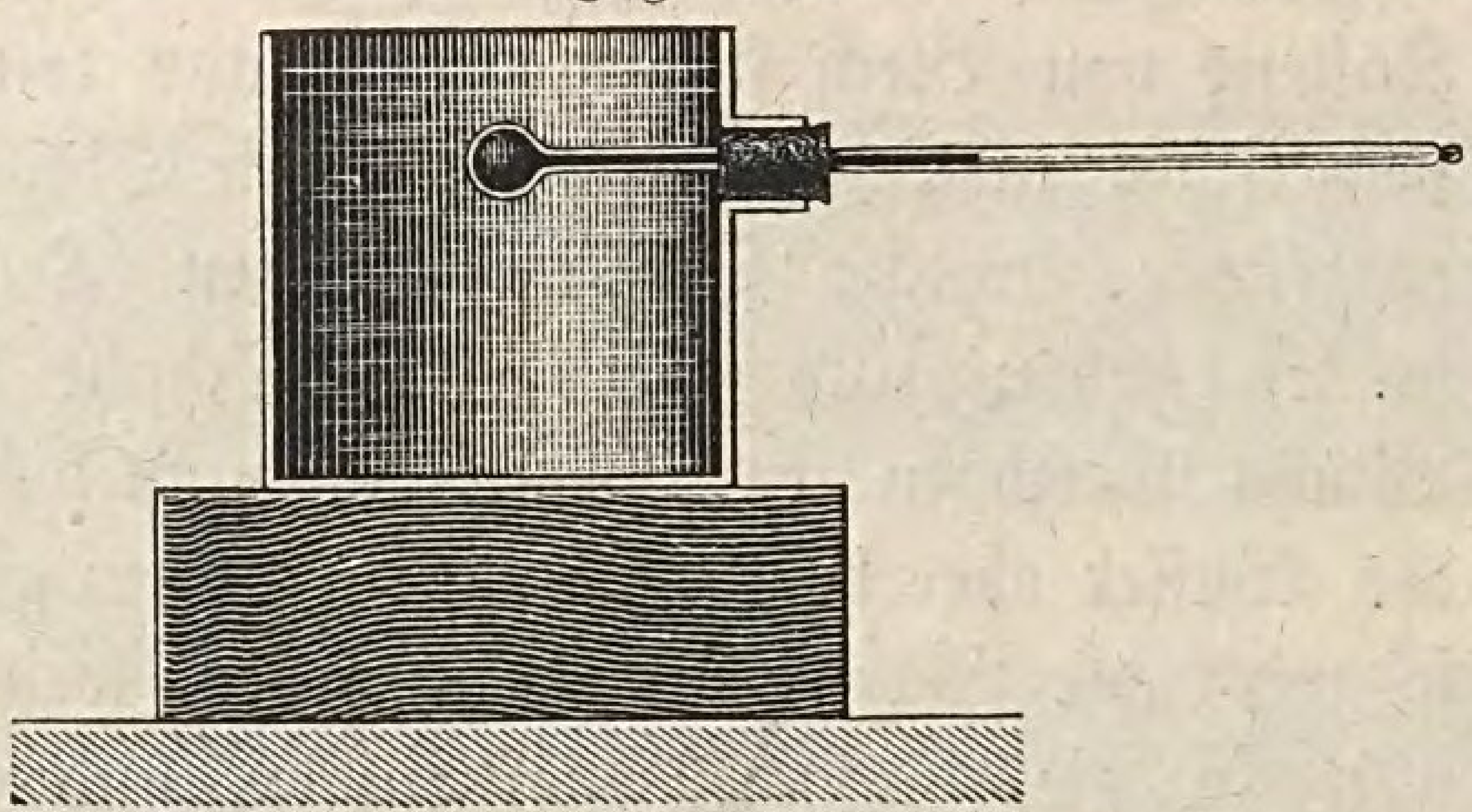
Im praktischen Leben machen wir von der guten oder schlechten Wärmeleitungsfähigkeit verschiedener Körper zahlreiche Anwendungen. Gegenstände, die man vor der Erkaltung schützen will, umgiebt man mit schlechten Wärmeleitern; man umwickelt Bäume und Sträuche bei Eintritt des Winters mit Stroh, um sie vor dem Erfrieren zu schützen; unsere Kleider halten warm, weil sie aus schlechten Wärmeleitern verfertigt sind. In einem kupfernen Gefäße bringt man unter sonst gleichen Umständen eine Flüssigkeit weit eher ins Kochen als in einem Porcellangefäße von derselben Wanddicke.

Man bekleidet die Wände des Eiskellers mit Stroh, um die Wärme des Bodens von dem Eise abzuhalten.

Wärmeleitung und Wärmeströmung in Flüssigkeiten und Gasen. 289 Die geringe Wärmeleitungsfähigkeit der Flüssigkeiten weist man nach, indem man dieselben von oben erwärmt. Um sich von der schlechten Leitungsfähigkeit des Wassers zu überzeugen, kann man den in Fig. 573 (a. f. S.) abgebildeten Versuch anstellen. In die Seitenwand eines aus Blech verfertigten Gefäßes wird mittels eines Korkes auf der Seite ein Thermometer eingesetzt und dann das Gefäß so weit voll Wasser gegossen, daß sich die Thermometerkugel ungefähr 2 mm unter dem Wasserspiegel befindet. Gießt man nun heißes Öl auf das Wasser, oder etwas Weingeist, den man

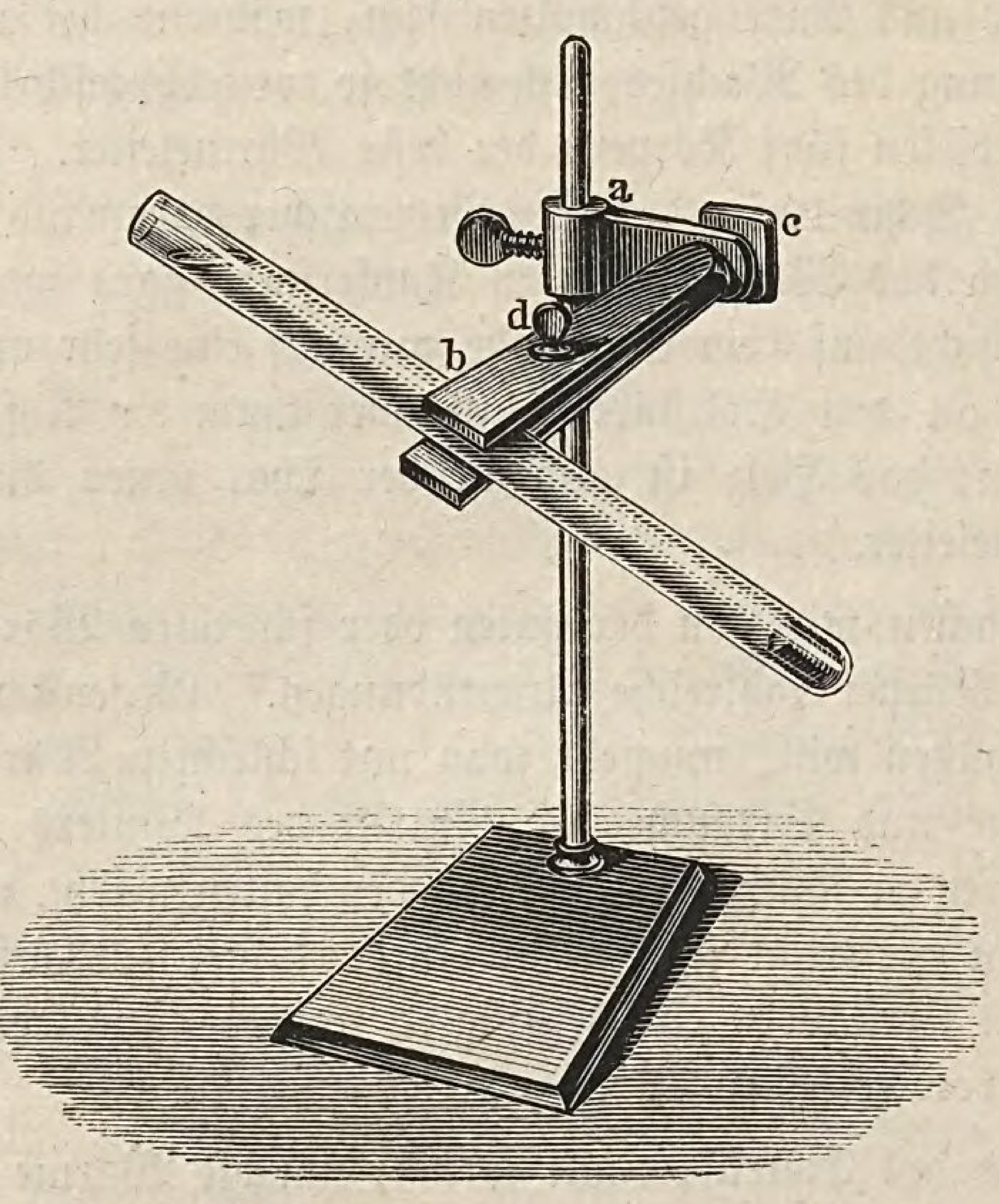
anzündet, so wird es doch eine geraume Zeit dauern, ehe das Thermometer eine merkliche Temperaturerhöhung zeigt.

Fig. 573.



Wenn man in ein mit kaltem Wasser gefülltes Reagenzröhrchen ein Stückchen Eis wirft, welches mit Draht umwickelt ist, damit es zu Boden sinkt, so kann man in der oberen Hälfte des schräg gehaltenen Röhrchens, Fig. 574, das Wasser mittels einer Weingeistlampe ins Kochen bringen, ohne daß unten ein merkliches Wegschmelzen des Eises stattfindet.

Fig. 574.

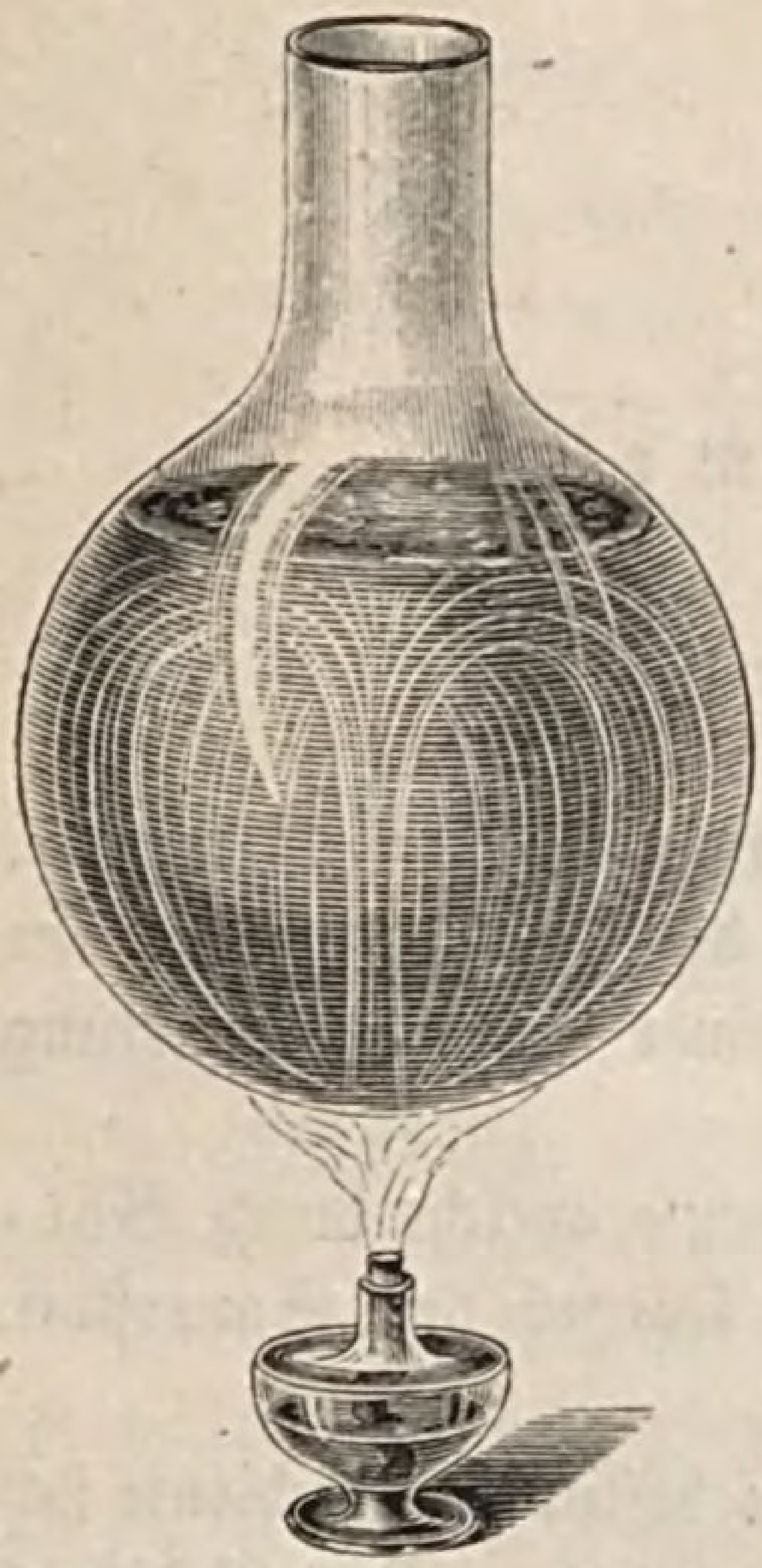


Despretz hat die Leitungsfähigkeit des Wassers bestimmt, indem er Wassersäulen von 1 m Höhe und 0,2 bis 0,4 m Durchmesser von oben her durch beständige Erneuerung von heißem Wasser erwärmte. Es dauerte ungefähr 30 Stunden, bis die Temperatur der Wassersäule an allen Stellen stabil wurde. Aus diesen Versuchen folgt, daß die Wärmeleitungsfähigkeit des Wassers ungefähr 96mal geringer ist als die des Kupfers.

Die Luft und die Gase überhaupt sind ebenfalls sehr schlechte Wärmeleiter, doch läßt sich ihr Wärmeleitungsvermögen durch Thermometer, die man etwa in verschiedenen Schichten der zu untersuchenden Luftmasse anbringen wollte, wegen der Wärmestrahlung nicht ermitteln. Daß jedoch die Gase überhaupt und die Luft insbesondere schlechte Wärmeleiter sind, geht daraus hervor, daß Körper, welche von allen Seiten von Luftschichten umgeben sind, nur sehr langsam erwärmt und erkaltet werden können, wenn nur der Wechsel der Luftschichten verhindert wird. Dadurch erklärt sich die Wirksamkeit der doppelten Fenster und der doppelten Thüren, um ein Zimmer warm zu halten. Das schlechte Leitungsvermögen lockerer Körper, wie Stroh, Wolle u. s. w., rührt größtenteils daher, daß die zahllosen Zwischenräume mit Luft ausgefüllt sind. Solche Körper, von denen

wir sagen, daß sie warm halten, wie z. B. unsere Kleider, Stroh, sind nicht selbst warm, ihre Wirkung beruht nur auf ihrer schlechten Wärmeleitungsfähigkeit; wenn man Eis in solche Körper einhüllt, so verhindern sie das Schmelzen desselben, weil sie die äußere Wärme abhalten.

Fig. 575.



Werden Flüssigkeiten oder Gase von unten erwärmt, so steigen die erwärmten Teilchen, da sie infolge der Ausdehnung leichter werden, in die Höhe, während die darüber gelegenen kälteren Teilchen, da sie schwerer sind, herabsinken und hierauf gleichfalls erwärmt werden. Es entsteht also ein aufsteigender, warmer Strom von der Wärmequelle fort und ein herabsinkender, kalter Strom nach der Wärmequelle hin. Diese Art der Wärmefortpflanzung kann nur bei Flüssigkeiten und Gasen vorkommen und heißt Wärmeströmung. Die Wärmeströmung läßt sich zeigen, wenn man eine Kochflasche (Fig. 575) mit Wasser füllt, welchem Sägespäne beigemischt sind, und dieselbe von unten erwärmt; man beobachtet alsdann an der Bewegung der Späne, daß die Strömung in der Mitte der Flasche von unten nach oben, an der Seite aber von oben nach unten erfolgt.

Fünftes Kapitel.

Quellen der Wärme.

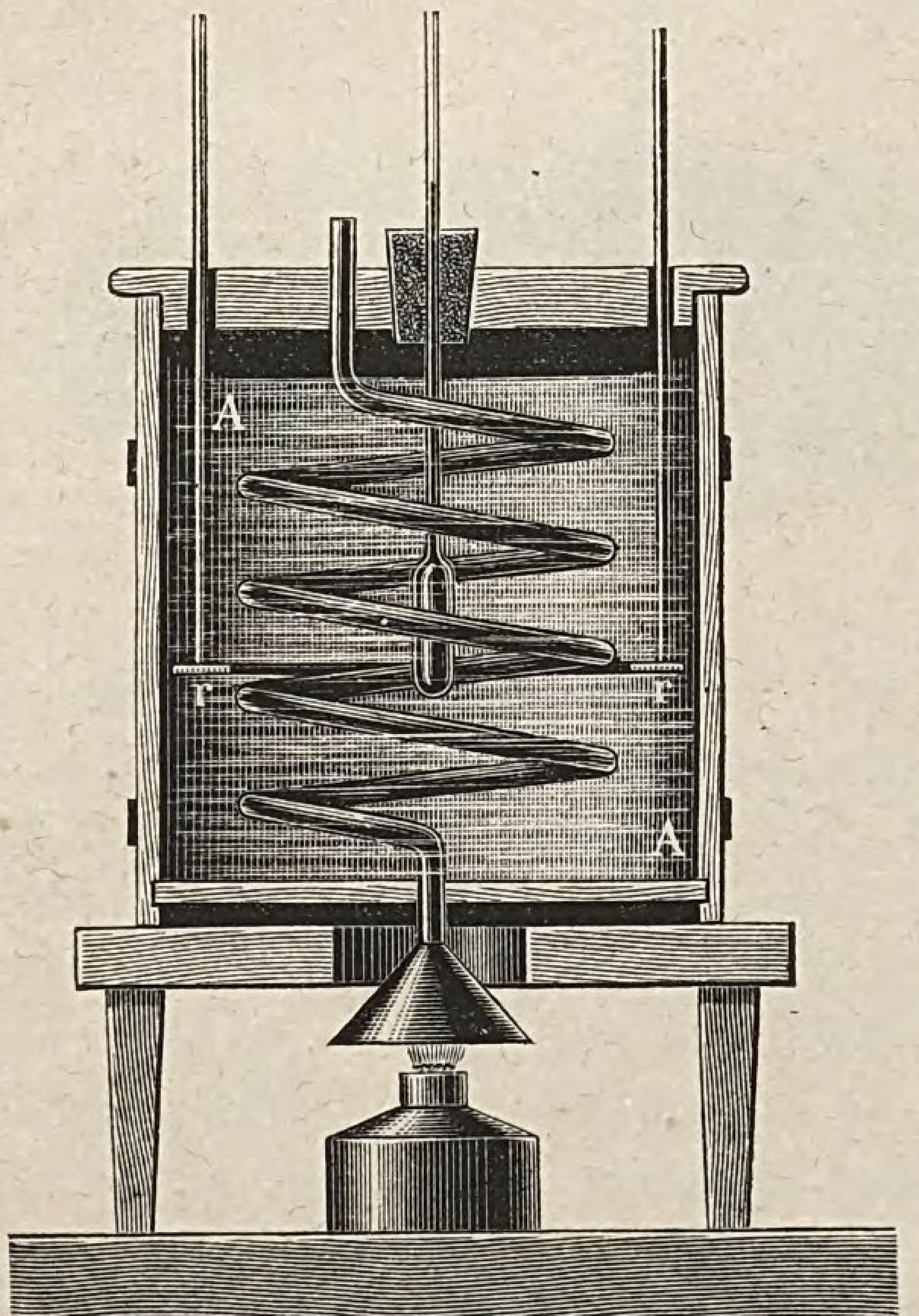
---

290 **Wärmeerzeugung durch chemische Verbindungen.** Nach der Sonne sind die chemischen Verbindungen die für uns wichtigsten Wärmequellen. Fast jeder chemische Prozeß ist von einer Wärmeentwickelung begleitet.

Von ganz besonderer Wichtigkeit ist diejenige Wärme, welche durch Verbrennung, also durch eine rasche Verbindung der Körper mit Sauerstoff, entwickelt wird.

Um die durch Verbrennung entwickelte Wärme zu bestimmen, bediente sich Rumford (1813) des in Fig. 576 abgebildeten Apparates. Das Gefäß *A* ist mit Wasser gefüllt, durch welches ein Schlangenrohr hindurchzieht. Der Eingang in das Schlangenrohr ist durch einen Trichter gebildet, unter welchen die zu verbrennenden Körper gebracht werden. Mit Öl und Alkohol ist der Versuch leicht anzustellen; man füllt sie nämlich in eine kleine Lampe, die man zu Anfang und zu Ende des Versuchs wägt, um die Menge des verbrannten Materials zu erfahren. Die Flamme und die Produkte der Verbrennung ziehen durch das Schlangenrohr hindurch und erwärmen das Wasser des Apparates. Aus der Temperaturerhöhung, welche das Wasser mit dem ganzen Apparate erfährt, läßt sich dann die Wärmemenge,

Fig. 576.



welche durch die Verbrennung erzeugt wurde, berechnen; doch darf man dabei die Wärme nicht unberücksichtigt lassen, mit welcher die gasförmigen Produkte der Verbrennung aus dem Schlangenrohre austreten.

Durch solche Versuche ergab sich, daß durch die Wärme, welche entwickelt wird bei

der Verbrennung von 1 g	die Temperatur von 1 kg Wasser erhöht werden kann um
Wasserstoffgas	36,40°
Ölbildendem Gas	12,20
Absolutem Alkohol	6,96
Kohle	7,29
Wachs	10,50
Rüböl	9,31
Talg	8,37

Tierische Wärme. Die Temperatur des Blutes aller Tiere 291 liegt gewöhnlich über der Temperatur des Mittels, in welchem sie leben; der tierische Körper hat also seine eigentümliche Wärme, er muß sie also auch fortwährend erzeugen können.

Die innere Wärme des Menschen scheint für alle Organe dieselbe und zwar derjenigen gleich zu sein, auf welche ein kleines Thermometer steigt, wenn man die Kugel unter die Zunge bringt und den Mund schließt, bis es nicht mehr steigt; diese Temperatur ist 37° C. Alter und Klima, Gesundheit oder Krankheit können diese Temperatur nur wenig ändern.

Die Blutwärme der Vögel ist größer als die der Säugetiere; sie beträgt im Durchschnitt 42°. Die Blutwärme der Säugetiere ist der des Menschen sehr nahe gleich. Bei den Vögeln und Säugetieren ist die Blutwärme von der Temperatur der Umgebung unabhängig; bei den übrigen Tierklassen aber, wie bei den Amphibien, Fischen, Insekten, ist die Temperatur des Körpers nur wenig von der Temperatur der Umgebung verschieden.

Welches ist nun die Quelle der tierischen Wärme? Die Luft, welche wir einatmen, wird in ähnlicher Weise verändert wie die Luft, welche zur Verbrennung gedient hat: statt des eingeatmeten Sauerstoffs hauchen wir Kohlensäure aus, es findet also im Körper wie bei der Verbrennung eine Oxydation statt. Seit Lavoisier (1777) diese Entdeckung gemacht hatte, war die Quelle der tierischen Wärme kein Geheimnis mehr.

Durch die Nahrung wird dem Blute Kohlenstoff zugeführt, welcher sich vorzugsweise in den kapillaren Verzweigungen der Adern mit dem Sauerstoff der eingeatmeten Luft verbindet; durch die Oxydation des Kohlenstoffs im Tierkörper wird aber die gleiche Wärmemenge erzeugt, wie wenn der Kohlenstoff durch schnelle Verbrennung in Kohlensäure verwandelt wird.

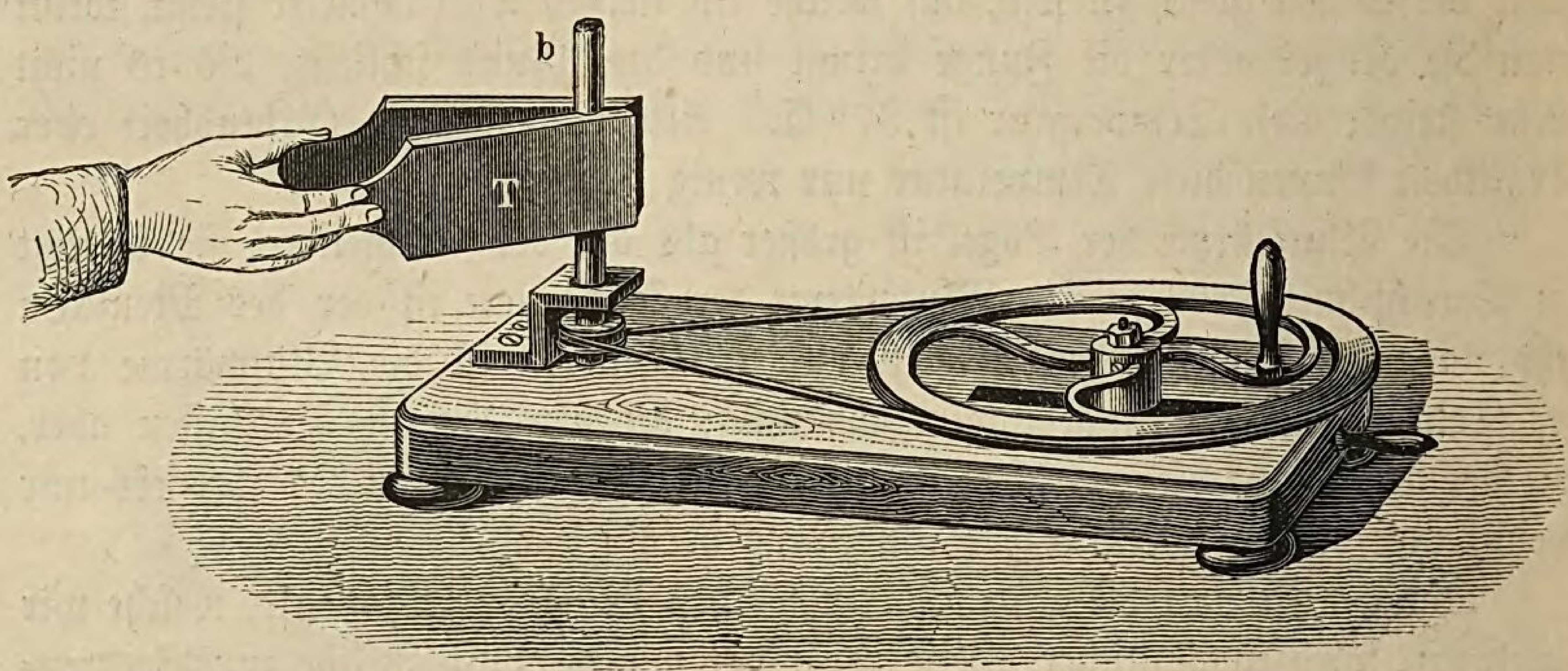
In einer kalten Umgebung verliert der Mensch und das Tier stets mehr Wärme, als in einer weniger kalten; da aber die Blutwärme bei den Säugetieren und Vögeln von der Temperatur der Luft unabhängig ist, so ist klar, daß im Kör-

per mehr Wärme erzeugt werden muß, wenn ihm durch den Aufenthalt in kalter Luft eine größere Wärmemenge entzogen wird, als wenn er in wärmerer Umgebung nur wenig Wärme nach außen hin abgiebt. Um aber in gleichen Zeiten mehr Wärme erzeugen zu können, muß dem Körper mehr Kohlenstoff zugeführt werden, damit durch dessen Oxydation die erforderliche Wärme erzeugt werde, wie man ja auch, um ein Zimmer bei großer Kälte auf einer bestimmten konstanten Temperatur zu erhalten, mehr Brennmaterial im Ofen verbrennen muß, als bei mäßiger Kälte. Dadurch erklärt sich nun, warum der Nordländer mehr Speisen und besonders mehr kohlenstoffhaltige Speisen zu sich nehmen muß, als der Bewohner der heißen Zone.

292 **Wärme durch mechanische Arbeit.** Werden zwei Körper an einander gerieben, so entsteht Wärme. Man beobachtet diese Wärmeentwickelung insbesondere beim Bremsen der Räder der Fuhrwerke und Eisenbahnwagen, beim Feuermachen mittels Stahl und Stein oder mittels Reibzündhölzchen, ferner bei der Bearbeitung der Metalle mittels Feile, Meißel und Bohrer.

Um von der Menge der entwickelten Wärme eine Vorstellung zu erhalten, befestigt man auf der Welle der Schwungmaschine (Fig. 577) eine kleine Messingröhre *b*, in die man 1 bis 2 ccm Wasser giebt, und verschließt sie

Fig. 577.



hierauf mit einem Stopfen. Wird hierauf das Schwungrad rasch umgedreht und dabei die Röhre mittels einer Holzzange *T* gebremst, so wird in kurzer Zeit so viel Wärme entwickelt, daß das Wasser in der Röhre verdampft und der Stopfen durch die Spannkraft des gebildeten Dampfes in die Höhe geschleudert wird. Ist der Apparat so eingerichtet, daß die Arbeit durch ein sinkendes Gewicht geleistet wird, und die Reibung unter Wasser von bekanntem Gewicht und bekannter Temperatur statt hat, so kann man die mechanische Arbeit, welche verschwindet, und die Wärmemenge, welche erzeugt wird, berechnen. Dabei stellt sich unter allen Umständen heraus, daß durch den Aufwand einer mechanischen Arbeit von 424 Kilogrammmeter eine Wärmeeinheit erzeugt wird, oder ein Kilogramm Wasser um 1° C. erwärmt werden kann.

Wenn die lebendige Kraft eines Körpers durch Stoß verschwindet, so wird gleichfalls Wärme erzeugt. Läßt man eine Bleikugel aus bedeutender Höhe auf eine harte Unterlage fallen, oder bearbeitet man dieselbe mittels eines Hammers, so erhitzt sie sich; abgeschossene Bleikugeln schmelzen sogar, wenn ihre Bewegung durch Aufschlagen auf einen harten Gegenstand plötzlich gehemmt wird. Versuche, bei denen einerseits die aufgewendete lebendige Kraft, andererseits die erzeugte Wärme gemessen wurde, haben ergeben, daß, übereinstimmend mit der Wärmeentwickelung durch Reibung, durch den Aufwand einer lebendigen Kraft von 424 kgm eine Wärmeeinheit entwickelt wird.

Auch entsteht Wärme, wenn ein elastischer Körper zusammengepreßt wird. Bei flüssigen und festen Körpern, welche sich nur wenig zusammendrücken lassen, ist die Erwärmung nur unbedeutend, dagegen wird bei der Kompression der Gase eine beträchtliche Wärmemenge entwickelt. Man beobachtet diese Wärmeentwickelung am deutlichsten an dem schon früher, S. 547, beschriebenen pneumatischen Feuerzeug. Führt man den Versuch so aus, daß die aufgewendete Arbeit sowie die entwickelte Wärme gemessen werden kann, so ergiebt sich wieder, daß durch Aufwand einer Arbeit von 424 kgm eine Wärmeeinheit erzeugt wird.

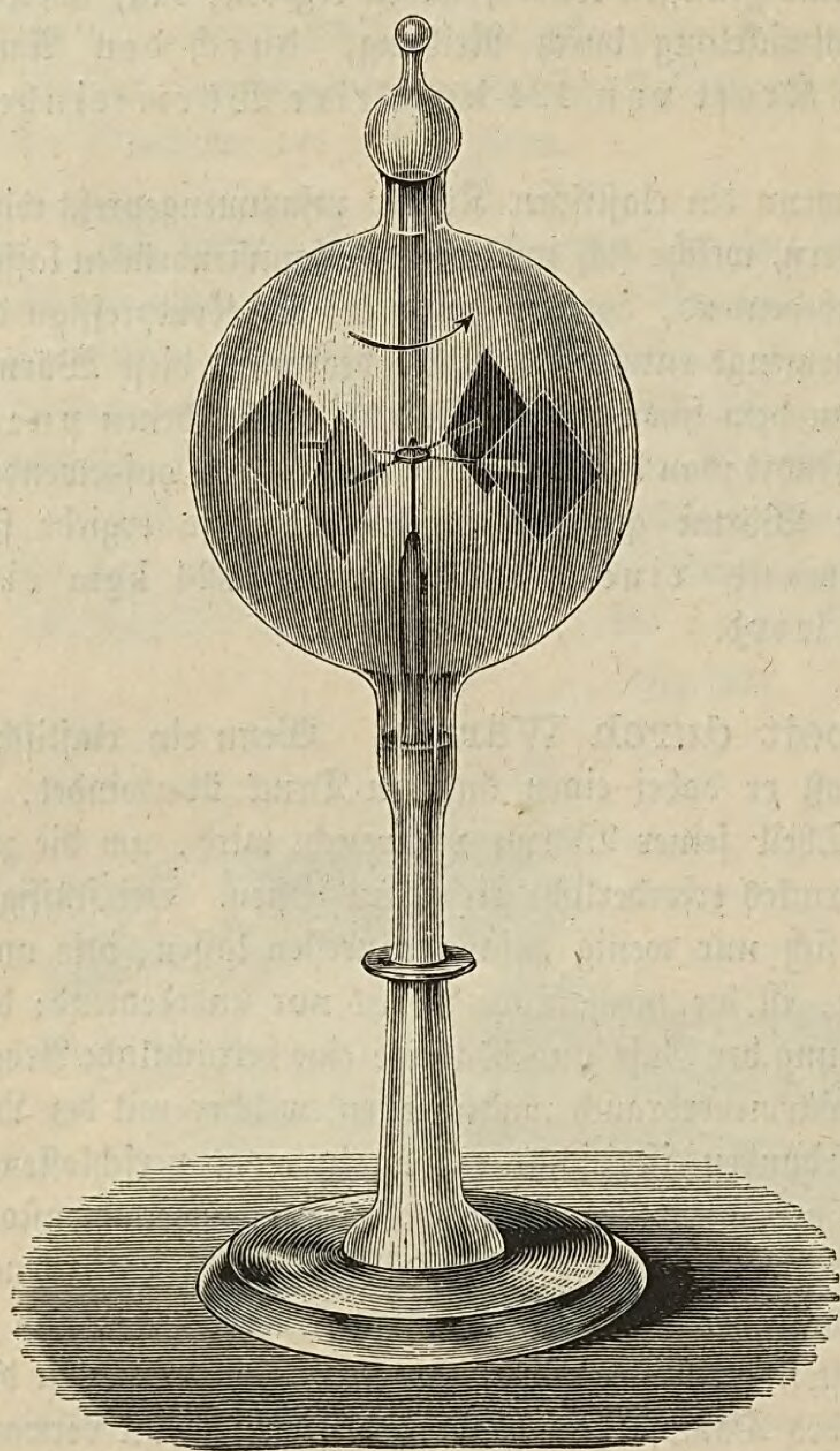
Mechanische Arbeit durch Wärme. Wenn ein elastischer Körper sich so ausdehnt, daß er dabei einen äußeren Druck überwindet, so wird er kälter, indem ein Theil seiner Wärme verbraucht wird, um die zur Überwindung des äußeren Druckes erforderliche Arbeit zu leisten. Bei flüssigen und festen Körpern, welche sich nur wenig zusammenpressen lassen, also auch nur wenig ausdehnen können, ist die mechanische Arbeit nur unbedeutend; dagegen kann durch die Ausdehnung der Gase und Dämpfe eine beträchtliche Arbeit geleistet werden. Um den Wärmeverbrauch nachzuweisen, welcher mit der Leistung mechanischer Arbeit verbunden ist, schüttle man in einer verschlossenen Flasche eine geringe Menge einer Mischung von Alkohol und Schwefelkohlenstoff. Wird hierauf die Flasche geöffnet, so wird ein Teil des darin enthaltenen Dampfes herausgetrieben, dabei der atmosphärische Druck überwunden und so eine mechanische Arbeit geleistet. Infolge davon sinkt die Temperatur in der Flasche unter den Taupunkt des Dampfes, so daß sich dieser in Nebel verwandelt. Dasselbe beobachtet man auch, wenn die Luft in einer Flasche, die etwas Wasser enthält, verdünnt wird; in diesem Falle wird Wärme verbraucht, um der ausströmenden Luft die erforderliche Geschwindigkeit zu erteilen. 293

In den Dampfmaschinen und in den Heißluftmaschinen, in welchen die Spannkraft erhitzter Luft als bewegende Kraft wirkt, ist mit der Arbeitsleistung gleichfalls ein Wärmeverbrauch verbunden. So lange die Maschine stillsteht, ist die Verbrennungswärme des Brennmaterials gleich der Wärme, welche von der Maschine nach außen abgegeben wird; sobald aber die Maschine arbeitet, ist erstere größer als letztere. Der Unterschied zwischen jener und dieser stellt den mit der Arbeitsleistung verbundenen Wärmeverbrauch vor. Genaue Unter-

suchungen haben ergeben, daß mit einer Arbeitsleistung von 424 kgm ein Verbrauch von einer Wärmeeinheit verbunden ist.

Hier ist auch noch das Radiometer zu erwähnen, welches von William Crookes 1873 erfunden wurde. Dasselbe besteht gewöhnlich aus einem möglichst luftleer gemachten Glasgefäße Fig. 578, in dessen Innern auf einer feinen Nadelspitze ein Glashütchen schwebt, an welchem vier Flügel aus geglühtem Glimmer durch dünnen Platindraht befestigt sind, so daß eine Art Schaufelrad mit vertikalstehender Axe gebildet wird. Die Flügel sind sämtlich auf der gleichen Seite mit Kienruß geschwärzt. Wird dieser Apparat der Wirkung von hellen oder dunklen Wärmestrahlen ausgesetzt, so beginnen sich die Flügel so zu drehen, daß die geschwärzten Flächen zurückweichen. Es genügt dazu das diffuse Tageslicht oder die Annäherung einer Kerze oder sogar die Annäherung der warmen Hand. Nähert man dagegen kalte Körper, oder übergießt man die Außenseite des Apparates mit kaltem Wasser oder mit Äther, so rotiert das Schaufelrad im entgegengesetzten Sinne.

Fig. 578.



294 **Die mechanische Wärmetheorie.** Wir haben bisher die wichtigsten Gesetze der Wärmeerscheinungen kennen gelernt, ohne daß die Rede davon gewesen wäre, was denn eigentlich die Wärme sei. In dieser Beziehung ist also die Wärmelehre ganz so behandelt worden, wie der erste Teil der Lehre vom Lichte, wo auch die empirischen Gesetze der Spiegelung und Brechung entwickelt wurden, ohne weiter nach dem Wesen des Lichtes zu fragen. Die Aufstellung einer Theorie, aus welcher sich alle Wärmeerscheinungen nicht

nur der Art, sondern auch der Größe nach so vollständig ableiten lassen, wie die Lichtphänomene aus der Wellentheorie, ist gerade gegenwärtig das Ziel der Bestrebungen vieler Physiker.

Früher stellte man sich die Wärme als einen imponderablen Stoff vor, welcher die Körper durchdringt; diese Vorstellung paßt sich mancher Erscheinung, wie z. B. der Wärmebindung, der Wärmekapacität, ganz gut an, sie giebt uns für diese Erscheinungen ein ganz gutes Bild, ja die Ausdrücke sind auch mit Zugrundelegung dieser Ansicht geschaffen. Wenn sich aber auch die Erscheinungen der Wärmekapacität, der latenten Wärme, der Wärmeleitung ganz gut mit der Vorstellung des Wärmestoffs vertragen, so ist doch dem jetzigen Standpunkte unserer physikalischen Kenntnisse gegenüber diese Ansicht völlig unhaltbar geworden.

Die Gesetze der strahlenden Wärme sind denen der Lichtstrahlung so ähnlich, daß die Idee nahe liegt, auch die Wärmestrahlung durch Äthervibrationen zu erklären. Wenn aber die strahlende Wärme in Vibrationen des Äthers besteht, so müßte die fühlbare Wärme durch Vibrationen der materiellen Teile der Körper selbst hervorgebracht werden.

Diese Ansicht wird durch die Thatsache unterstützt, daß durch mechanische Mittel, durch Reibung, durch Kompression u. s. w., Wärme erzeugt wird, was sich auf keinerlei Weise durch die ruhende Gegenwart eines imponderablen Wärmestoffs, sondern nur dadurch erklären läßt, daß man die Wärme als das Resultat von Molekularbewegungen betrachtet und sie also auf mechanische Principien zurückführt.

Wenn man die Wärmephänomene auf eine Molekularbewegung zurückführen will, so muß man die Produktion von Wärme durch mechanische Kräfte als eine Umwandlung von Massenbewegung in Molekularbewegung betrachten, während umgekehrt die Leistung mechanischer Arbeit durch Wärme eine Umwandlung der Molekularbewegung in Massenbewegung ist.

Daraus folgt aber ferner, daß, wie schon in den beiden vorhergehenden Paragraphen angeführt wurde, zwischen der erzeugten Wärme und der zu diesem Zwecke konsumierten mechanischen Arbeit ein unveränderliches Größenverhältnis bestehen, daß es ein mechanisches Äquivalent der Wärme geben müsse. J. R. Mayer in Heilbronn hat 1842 diese Idee zuerst ausgesprochen, eine genaue Bestimmung dieses Äquivalents ist aber bald darauf und nach verschiedenen Methoden namentlich durch Joule und Hirn ausgeführt worden. Als Mittel aus den besten hierher gehörigen Versuchen ergiebt sich das mechanische Äquivalent der Wärme, oder genauer ausgedrückt das Arbeitsäquivalent der Wärmeeinheit gleich

424 Meterkilogrammen,

d. h. man muß eine mechanische Arbeit von 424 Meterkilogrammen anwenden, um eine Wärmeeinheit, d. h. so viel Wärme zu produzieren als nötig ist, um die Temperatur von 1 Kilogramm Wasser um 1° C. zu erhöhen.

Wenn man aber durch mechanische Arbeit Wärme erzeugen kann, so muß auch umgekehrt die Wärme im Stande sein mechanische Effekte hervorzubringen, und zwar muß eine Wärmeeinheit im Stande sein eine Arbeit von 424 Meterkilogrammen zu leisten, wie dies gleichfalls durch Versuche bestätigt worden ist. Näheres darüber im Supplementband.

Die Lehre vom mechanischen Äquivalent der Wärme bildet den Ausgangspunkt für die Entwickelung der mechanischen Wärmetheorie, um welche sich namentlich Clausius, Thomsen und Andere verdient gemacht haben.

Die Art und Weise, wie man sich die thermische Molekularbewegung zu denken habe, ist noch nicht ganz festgestellt; nach Clausius kann man sich davon ungefähr folgende Vorstellung machen: Die im Verhältnis zu den Zwischenräumen verschwindend kleinen Moleküle der Gase und Dämpfe bewegen sich in gerader Linie mit konstanter Geschwindigkeit, bis sie gegen andere Gasmoleküle oder eine für sie undurchdringliche Wand stoßen. Der Druck des Gases gegen eine feste Wand hat dann seinen Grund darin, daß die Moleküle fortwährend in großer Zahl gegen die Wand fliegen und von ihr abprallen.

Bei den festen Körpern oscillieren die Moleküle um eine feste Gleichgewichtslage; bei den flüssigen findet eine solche Gleichgewichtslage zwar nicht mehr statt, allein die Moleküle sind doch trotz ihrer beständigen und mannigfaltigen Bewegungen an bestimmte Abstände gebunden, sie können nicht frei auseinander fahren, wie bei den Gasen.

Die strahlende Wärme, vollkommen identisch mit den Lichtstrahlen, besteht in der Vibrationsbewegung des Äthers, während die Bewegung der Körpermoleküle die Quelle der fühlbaren Wärme ist.

Wie man sich auch die thermische Molekularbewegung denken mag, so ist die Temperatur proportional der lebendigen Kraft der einzelnen Moleküle, also proportional ihrer Masse und proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit, mit welcher sie sich bewegen. Der wahre Nullpunkt der Temperatur wird also da liegen, wo die Molekularbewegung und also auch die Spannkraft der Gase aufhört.

Denken wir uns ein Gas in ein Gefäß von unveränderlicher Größe eingeschlossen, so verhalten sich nach Seite 501, Gleichung 3, seine Spannkräfte wie seine absoluten Temperaturen. Demnach muß auch, wenn das Gas auf den wahren Nullpunkt der Temperatur abgekühlt und somit seine Spannkraft gleich Null wird, auch seine absolute Temperatur gleich Null werden. Der wahre Nullpunkt der Temperatur fällt somit mit dem Nullpunkt der absoluten Temperatur zusammen und liegt also 273° nach Celsius unter dem Gefrierpunkte des Wassers.

Wenn einem Körper Wärme zugeführt wird, so kommt dieselbe keineswegs der Temperaturerhöhung allein zu Gute. Die Temperaturerhöhung ist nämlich stets von einer Ausdehnung der Körper begleitet, welche nicht vor sich gehen kann, ohne daß zweierlei Widerstände überwunden werden.

1) Der Abstand der Körperatome von einander wird vergrößert, und dem wirkt die Molekularattraktion entgegen. Die Überwindung dieses Widerstandes wird als innere Arbeit bezeichnet.

2) Indem ein Körper sich ausdehnt, hat er den auf ihm lastenden Druck (gewöhnlich den Druck der Atmosphäre) zu überwinden; die dazu erforderliche Arbeit wird äußere Arbeit genannt.

Bei den festen und flüssigen Körpern ist die Ausdehnung so gering, daß die bei ihrer Erwärmung zu leistende äußere Arbeit verschwindend klein ist.

Bei den Gasen dagegen ist der Abstand der Atome bereits so groß, daß die Attraktion der Moleküle, also auch die bei ihrer Temperaturerhöhung zu leistende innere Arbeit gleich Null ist.

Wenn also eine Luftmasse so eingeschlossen ist, daß sie sich nicht ausdehnen kann, so wird alle ihr zugeführte Wärme lediglich zu ihrer Erwärmung, d. h. zur Beschleunigung der Molekularbewegung verwendet. — Es sei a die Wärmemenge, welche der gegebenen Luftmasse zugeführt werden muß, um dieselbe bei konstantem Volumen um t Grade zu erwärmen. Wird aber dieselbe Luftmasse erwärmt, während sie sich unter konstantem Druck frei ausdehnen kann, so sind, wie wir auf Seite 547 gesehen haben, 1,41 a Wärmeeinheiten nötig, um die gleiche Temperaturerhöhung zu bewirken; der Mehrverbrauch von 0,41 a Wärmeeinheiten ist für die äußere Arbeit verwendet worden, welche geleistet werden muß, wenn sich die Luft in entsprechender Weise ausdehnen und den Druck der äußeren atmosphärischen Luft überwinden soll.

Die Wärme, welche bei der Schmelzung fester und bei der Verdampfung flüssiger Körper gebunden wird, also der Temperaturerhöhung nicht zu Gute kommt, ist zu Überwindung des Zusammenhanges der Teilchen, also zur Leistung innerer Arbeit erforderlich.

Sechstes Buch.

Meteorologie.

Erstes Kapitel.

Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche.

Gegenstand und Aufgabe der Meteorologie. Die Bestrahlung der Erde durch die Sonne hat eine Reihe von Erscheinungen zur Folge, welche, soweit sie nicht lebende Wesen betreffen, den Gegenstand der Meteorologie bilden. 295

Die Sonnenstrahlen bewirken zunächst die Erwärmung der Erdoberfläche und der atmosphärischen Luft; demgemäß beschäftigt sich auch der erste Teil der Meteorologie mit den Temperaturverhältnissen auf der Erdoberfläche.

Mit der Erwärmung der Luft wird aber auch ihre Spannkraft verändert, wodurch dann Bewegungen der Luftmassen entstehen; der zweite Teil der Meteorologie behandelt daher die Änderungen des Barometerstandes, die Winde und die Stürme.

Durch die Erwärmung des Wassers auf der Erdoberfläche wird ein Teil desselben verdampft, der Dampf in der Luft verbreitet und infolge von Abkühlung als Nebel, Wolken, Tau, Reif, Regen, Schnee und Hagel wieder niederschlagen. Die Lehre von den wässerigen Erscheinungen der Atmosphäre oder den Hydrometeoren bildet den dritten Teil der Meteorologie.

Die Meteorologie betrachtet endlich noch gewisse optische, elektrische, magnetische und kosmische Erscheinungen, die man in der freien Natur teils regelmäßig, teils als seltene Phänomene zu betrachten Gelegenheit hat.

Die Aufgabe der Meteorologie besteht nun zunächst darin, die eben erwähnten Erscheinungen qualitativ und quantitativ kennen zu lernen und die Ergebnisse in statistischer Form zu sammeln, dann die beobachteten Erscheinungen zu erklären, d. h. auf ihre Ursachen zurückzuführen und endlich, was jedoch vorläufig noch als frommer Wunsch zu bezeichnen ist, den Eintritt künftiger Erscheinungen vorauszubestimmen.

296 **Die Erwärmung der Erdoberfläche durch die Sonne.** Die Erwärmung der Erdoberfläche und der Atmosphäre rührt fast ausschließlich von der Sonne her; denn die eigentümliche Wärme des Erdkörpers ist auf seiner Oberfläche unmerklich und die Wärmemenge, welche durch chemische Prozesse entwickelt wird, ist verschwindend klein gegen die ungeheure Zufuhr an Wärme, welche die Erde von der Sonne empfängt. In der That fand Pouillet (1838) mittels des von ihm konstruierten Pyrheliometers, daß die gesamte Wärme, welche die Sonne nach der Erde in senkrechter Richtung gegen eine Fläche von nur 1 qm Inhalt in jeder Minute ausstrahlt, die Temperatur von 17,6 kg Wasser um 1° C. zu erhöhen vermag. Hieraus ergiebt sich durch eine einfache Rechnung, daß die Wärme, welche die Erde während eines Jahres von der Sonne empfängt, im Stande wäre, eine die ganze Erde umgebende Eisschicht von 31 m Dicke abzuschmelzen.

Indem nun die Sonnenstrahlen die Atmosphäre durchwandern, erleiden sie eine verhältnismäßig geringe Absorption, weil die Luft ein sehr diathermaner Körper ist; jedenfalls ist die direkte Erwärmung der Luft durch absorbierte Sonnenstrahlen eine sehr unbedeutende. Erst wenn die Sonnenstrahlen den Erdboden selbst treffen, werden sie absorbiert und in fühlbare Wärme verwandelt. Von dem erwärmten Boden wird dann die Lufthülle der Erde von unten her durch Strömung erwärmt.

Die Erwärmung des Bodens hängt von der Richtung ab, in welcher die Sonnenstrahlen ihn treffen. Da diese Richtung eine nach bestimmten Gesetzen regelmäßig wechselnde ist, so ist klar, daß der Erwärmungszustand der Erdoberfläche und der unteren Schichten der Atmosphäre periodische Variationen erleiden muß, und zwar haben wir eine tägliche und eine jährliche Periode im Gange der Lufttemperatur (der Temperatur der unteren Luftschichten) zu unterscheiden.

Während der Erde durch die Sonnenstrahlen Wärme zugeführt wird, verliert sie dagegen Wärme durch Ausstrahlung gegen die kälteren Himmelsräume. Im allgemeinen halten sich Ein- und Ausstrahlung das Gleichgewicht, d. h. die Summe der Wärme, welche der Erde durch die Sonnenstrahlen zugeführt wird, ist derjenigen gleich, welche sie durch Ausstrahlung verliert. Dabei ist aber die Wärme über die Erdoberfläche weder gleichförmig noch unveränderlich verteilt. Die höchste Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Luftschichten finden wir in den Äquatorialgegenden, während es um so kälter wird, je mehr wir uns den Polen nähern. Fassen wir aber die Temperatur irgend eines bestimmten Ortes auf der Erdoberfläche ins Auge, so zeigt sich, daß sie beständigen Schwankungen unterworfen ist, indem infolge der veränderlichen Stellung der Sonne gegen die Erdoberfläche bald die Einstrahlung, bald die Ausstrahlung das Übergewicht gewinnt.

Da nun aber die Veränderung, welche die Stellung der Sonne gegen die Erdoberfläche erfährt, an zwei Perioden, eine tägliche und eine jährliche, gebunden ist, so ist klar, daß auch die Variationen der Temperatur an irgend einem Orte der Erdoberfläche eine tägliche und eine jährliche Periode befolgen müssen.

Die fünf Zonen. Für verschiedene Gegenden der Erdoberfläche sind 297
die Insolationsverhältnisse äußerst ungleich. Innerhalb der Wendekreise, wo Tag und Nacht das ganze Jahr hindurch fast gleich sind, wo die Sonne bei ihrem höchsten Mittagsstande das Zenith passiert, und wo die niedrigste Mittagshöhe mindestens 44° (die niedrigste Mittagshöhe der Sonne ist für die Wendekreise 43° 42′, für den Äquator 66° 32′) beträgt, wo also täglich die Sonnenstrahlen eine kräftige Wirkung ausüben können, muß auch stets eine hohe Lufttemperatur herrschen. Jener zwischen den Wendekreisen gelegene Äquatorialgürtel wird deshalb auch heiße Zone genannt. Sie ist der Schauplatz des reichsten Tier- und Pflanzenlebens.

Den Gegensatz der heißen Zone bilden die Umgebungen der Pole.

Innerhalb der beiden von den Polarkreisen (66° 32′ nördlicher und südlicher Breite) begrenzten Kugelabschnitte kommt die Sonne Tage, Wochen, Monate lang gar nicht über den Horizont, und auch dann nur, um ihre Strahlen in sehr schräger Richtung auf den Boden zu senden; hier also kann nur eine geringe Wärmeentwickelung stattfinden, und hier starrt deshalb auch fast das ganze Jahr hindurch die Natur in Schnee und Eis.

Der von dem nördlichen Polarkreise eingeschlossene Raum wird die nördliche, der von dem südlichen Polarkreise eingeschlossene Raum wird die südliche kalte Zone genannt.

Der Gürtel zwischen dem nördlichen Wendekreise und dem nördlichen Polarkreise bildet die nördliche gemäßigte Zone, gleichwie die südliche gemäßigte Zone sich vom südlichen Wendekreise bis zum südlichen Polarkreise erstreckt. Je mehr man in diesen gemäßigten Zonen gegen die Polarkreise vordringt, desto mehr nähern sich die Temperaturverhältnisse denen der kalten Zone.

Im allgemeinen also sind die Temperaturverhältnisse eines Ortes eine Funktion seines Abstandes vom Äquator, also seiner geographischen Breite, und wenn sie nur von den Insolationsverhältnissen bedingt wären, wenn nicht andere Faktoren modificierend einwirkten, so müßte die mittlere Lufttemperatur gleich sein für alle Orte gleicher geographischer Breite. Wir werden bald sehen, daß und warum dies nicht der Fall ist.

Die täglichen Variationen der Lufttemperatur. Wenn 298
die Sonne, nachdem sie am östlichen Himmel aufgegangen ist, höher und höher über den Horizont sich erhebt, so muß die immer kräftiger wirkende Insolation ein Steigen der Lufttemperatur zur Folge haben. Wenn die Sonne ihren höchsten Stand erreicht hat, so ist jedoch die Temperatur der Erdoberfläche noch keineswegs so hoch gestiegen, daß sie eben so viel Wärme gegen den Himmelsraum ausstrahlen könnte, als sie durch die Sonnenstrahlen empfängt. Deshalb dauert das Steigen der Temperatur noch über Mittag fort, und erst in 1 bis 2 Stunden nach der Kulmination der Sonne, wenn ihre Höhe schon merklich abgenommen hat, tritt vorübergehend ein Gleichgewichtszustand zwischen Ein- und Ausstrahlung ein; das Maximum der täglichen Temperatur findet also erst

um 1 bis 2 Uhr Nachmittags statt. Von da an aber gewinnt bei immer mehr sinkender Sonne die Ausstrahlung das Übergewicht, die Temperatur sinkt anfangs langsam, dann rascher in den Abendstunden. Während der Nacht, wo gar keine Einstrahlung stattfindet, dauert das Sinken der Temperatur mit abnehmender Schnelligkeit fort, bis sie zur Zeit des Sonnenaufganges ihr Minimum erreicht hat und wiederum ein vorübergehender Gleichgewichtszustand eintritt.

Da im Sommer die Sonnenhöhen im Laufe des Tages zwischen weiteren Grenzen variieren (zwischen 0 und 63° für das mittlere Deutschland), als im Winter (zwischen 0 und 17° für den 50. Breitegrad), so ist klar, daß die Grenzen, zwischen welchen die Temperatur im Laufe eines Tages schwankt, im Sommer weiter auseinander liegen als im Winter. In der That beträgt z. B. für München die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Temperatur des Tages im Monate Januar im Durchschnitt nur 2° C., während im Juli das tägliche Maximum durchschnittlich 6,2° höher ist als das tägliche Minimum.

Aus ähnlichen Gründen müssen nun auch die täglichen Temperaturschwankungen in den Äquatorialgegenden viel bedeutender sein als in höheren Breiten. Auch dies wird durch die Erfahrung bestätigt; so beobachtete z. B. Barth auf seiner Reise in das Innere von Afrika vom Aufgang der Sonne bis zum Nachmittage oft ein Steigen von 6 bis 30, ja von 8 bis 43° Celsius.

Im allgemeinen bestätigt die Erfahrung allerdings die Resultate unserer obigen Raisonnements über den täglichen Gang der Wärme; sobald wir aber einzelne Tage herausgreifen, finden wir häufig solche Störungen des normalen Ganges, daß das Gesetz vollständig verwischt erscheint.

Von der Natur dieser Störungen und ihren Ursachen wird weiter unten die Rede sein.

299 **Die Jahreszeiten.** Die Sonne teilt nicht allein mit dem ganzen Himmelsgewölbe die scheinbare tägliche Umdrehung, sondern sie legt auch im Laufe eines Jahres am Himmelsgewölbe scheinbar eine Bahn zurück, welche zur Hälfte nördlich, zur anderen Hälfte südlich von dem Himmelsäquator liegt. Eine Folge davon ist, daß wenigstens in den gemäßigten Zonen Tagesdauer und Mittagshöhe der Sonne ein halbes Jahr lang zu- und dann in der folgenden Jahreshälfte in gleicher Weise wieder abnehmen. Dies hat dann den regelmäßigen Wechsel der Jahreszeiten zur Folge, deren Verlauf wir zunächst für die geographische Breite von Mitteldeutschland betrachten wollen.

Am 21. März überschreitet die Sonne den Himmelsäquator und geht von der südlichen auf die nördliche Himmelskugel über. Tag und Nacht sind gleich lang, und die Mittagshöhe, zu welcher die Sonne ansteigt, beträgt 40°. Nun aber findet eine rasche Zunahme der Mittagshöhe der Sonne sowohl wie auch der Tagesdauer statt; bei immer kräftiger werdender Insolation bleibt der Boden nun länger und länger dem erwärmenden Einflusse der Sonnenstrahlen ausgesetzt, die Lufttemperatur muß also steigen.

Allmählich wird die Zunahme der Tagesdauer und der Mittagshöhe langsamer, bis endlich am 21. Juni die Sonne ihre größte nördliche Breite erreicht, und somit auch der längste Tag von 16 Stunden und die größte Mittagshöhe der Sonne von $63^1/_2$ Graden eintritt.

Aus demselben Grunde, nach welchem das tägliche Maximum der Temperatur nicht auf die Mittagsstunde fällt, tritt auch das jährliche Temperaturmaximum nicht mit dem längsten Tage ein, sondern später, so daß im Durchschnitt der Juli der heißeste Monat ist.

Nach dem längsten Tage nimmt die Tagesdauer und die Mittagshöhe der Sonne erst langsam, dann rascher ab, und mit der rascheren Abnahme beider stellt sich dann auch ein Sinken der Luftwärme ein. Am 22. September, dem Herbstäquinoctium, überschreitet die Sonne abermals den Himmelsäquator und geht auf die südliche Hälfte der Himmelskugel über. Nun wird die Nacht länger als der Tag, die Mittagshöhe der Sonne nimmt mehr und mehr ab, bis sie am 21. December, als am kürzesten Tage von nur 8 Stunden Länge, ihr Minimum von 17 Grad erreicht. Unter diesen Umständen, da die Wirkung der ohnehin sehr schräg auffallenden Sonnenstrahlen nur auf wenige Stunden beschränkt bleibt, und der Boden die lange Nacht hindurch Wärme durch Ausstrahlung verliert, muß die Lufttemperatur bedeutend sinken; doch tritt das Minimum der Jahrestemperatur in der Regel erst gegen die Mitte des Januars ein, da unmittelbar nach dem kürzesten Tage die Zunahme der Tageslänge und der Mittagshöhe der Sonne noch zu unbedeutend ist, um ein Steigen der Temperatur bewirken zu können.

So ist denn im allgemeinen der Gang der Lufttemperatur im Laufe des Jahres für Deutschland folgender: Von der Mitte Januar an steigt die Temperatur bis gegen die Mitte Juli, um von da allmählich bis zur Mitte Januar wieder abzunehmen. Das Steigen und Fallen der Temperatur ist am langsamsten vor und nach der Zeit des jährlichen Maximums und Minimums, am raschesten um die Zeit der Äquinoctien.

Die drei heißesten Monate, Juni, Juli und August, bilden den Sommer, die Zeit, in welcher die kräftigste Entwickelung der Vegetation vor sich geht. Den Winter bilden die drei kältesten Monate, December, Januar und Februar, während welcher die Vegetation fast gänzlich ruht. Während des Frühlings, März, April und Mai, findet ein allmähliches Erwachen, während des Herbstes, September, Oktober und November, ein allmähliches Absterben der Pflanzenwelt statt.

Die Differenz zwischen der mittleren Temperatur des heißesten und des kältesten Monats beträgt für Deutschland im Durchschnitt 20° C.

Der eben beschriebene Wechsel der Jahreszeiten bezieht sich auf Länder mittlerer geographischer Breite; in höheren wie in niedereren Breiten gestaltet sich die Sache wesentlich anders.

Unter höheren Breiten wird die Dauer des kürzesten Tages immer geringer, die Sonnenhöhe immer unbedeutender; die Winterkälte muß also gegen die Pole hin immer zunehmen. Zugleich aber nimmt die Dauer des Winters zu,

denn während der Äquinoctialperiode ist die Wirkung der Sonnenstrahlen in jenen Ländern noch viel zu gering, um Eis und Schnee zu schmelzen oder das Gefrieren des Wassers zu verhindern; der Winter erstreckt sich also noch über einen Teil der Monate, welche bei uns den Frühling und den Herbst ausmachen. Im Sommer aber wird die im Vergleich zu unseren Gegenden geringere Mittagshöhe der Sonne (unter dem 60. Breitengrade z. B., welcher ungefähr über Petersburg und Stockholm geht, ist der längste Tag $18^1/_2$ Stunden, die höchste Mittagshöhe der Sonne $53^1/_2{}^0$) durch die längere Dauer der Sommertage nahezu wieder ausgeglichen, so daß die Sommerhitze immer noch eine sehr bedeutende werden kann. In jenen Gegenden herrscht also ein langer kalter Winter, welcher rasch in einen heißen kurzen Sommer übergeht, so daß die Übergangs-Jahreszeiten, Frühling und Herbst, mehr und mehr verschwinden.

Innerhalb der Polarkreise fallen endlich die Sonnenstrahlen selbst zur Zeit der größten Sonnenhöhe noch so schräg auf, daß sie trotz der langen Tagesdauer keine kräftige Erwärmung hervorbringen können; statt des Sommers tritt nur eine mehr oder weniger bedeutende Unterbrechung in der Strenge der Winterkälte ein.

Wenden wir uns von Deutschland aus zu südlicheren Ländern, so muß dort aus zweierlei Gründen der Winter immer milder werden, denn einmal erreicht die Sonne selbst zur Zeit des Wintersolstitiums noch eine ziemlich bedeutende Mittagshöhe, unter dem 30. Breitengrade z. B. noch $36^1/_2{}^0$, während zugleich die Dauer der Wintertage größer ist als bei uns; für den 30. Breitengrad z. B. ist die Dauer des kürzesten Tages 10 Stunden 4 Minuten. Während so die Winterwärme steigt, wächst die Sommerwärme nicht in gleichem Maße, denn die Wirkung der größeren Sonnenhöhe wird dadurch zum Teil neutralisiert, daß die Sommertage nicht so lang sind als bei uns.

Die Differenz zwischen Sommer- und Wintertemperatur muß also um so mehr abnehmen, je mehr wir uns von den Polen aus den Wendekreisen nähern.

Innerhalb der Wendekreise aber verschwindet der Charakter unserer Jahreszeiten fast ganz. Auf dem Äquator passiert die Sonne zweimal, im März und September, das Zenith, während die niedrigste Mittagshöhe der Sonne (Ende Juni und December) noch $66^1/_2{}^0$ beträgt. Bedenkt man ferner, daß auf dem Äquator das ganze Jahr hindurch Tag und Nacht gleich sind, so begreift man leicht, daß die jährlichen Temperaturvariationen für die Äquatorialgegenden nur sehr unbedeutend sein können.

Vom Äquator aus gegen die Wendekreise hin wird allmählich der Charakter unserer Jahreszeiten wieder merklich, während er erst in den gemäßigten Zonen entschieden zur Geltung kommt.

In der südlichen gemäßigten Zone wechseln die Jahreszeiten wie bei uns, nur ist begreiflich dort Winter, wenn wir Sommer haben und umgekehrt.

Im allgemeinen bestätigt die Erfahrung die Resultate der obigen Betrachtung. So beträgt z. B. die Differenz zwischen der mittleren Temperatur des heißesten und kältesten Monats für

Quito . . .	1,8° C.	München . . .	19,5° C.
Havanna . .	5,6	Prag	23,3
Mexico . . .	7,9	Moskau	29,4
Palermo. . .	13,9	Irkutzk	36,9
Rom	17,1	Jakutzk	63,5

Modifikationen normaler Temperaturverhältnisse. Die durch die Anziehung der Sonne vorgeschriebene Bahn eines jeden Planeten wird durch den störenden Einfluß der übrigen Planeten nur sehr wenig abgeändert; die Störungen spielen hier nur eine untergeordnete Rolle. Anders ist es mit den klimatischen Verhältnissen. Allerdings ist der Erwärmungszustand der unteren Luftschichten eine von den Insolationsverhältnissen abhängige Größe; diese Abhängigkeit wird jedoch noch von anderen unregelmäßig wirkenden Ursachen derart beeinflußt, daß die Störungen den regelmäßigen Gang oft gänzlich verdecken. Wäre die Natur der Erdoberfläche überall dieselbe, fehlte also die Abwechselung zwischen Wasser und Land, zwischen Berg und Thal, zwischen bewaldetem und pflanzenleerem Boden, würde ferner die Wirkung der Insolation nicht durch wechselnde Bewölkung des Himmels modificiert, und würde endlich die Wärme nicht durch Luft- und Meeresströmungen von einem Orte zum anderen fortgeführt: so müßten nicht allein alle Orte gleicher geographischer Breite gleiche klimatische Verhältnisse haben, sondern es müßten auch die täglichen und jährlichen Variationen der Lufttemperatur vollkommen regelmäßig verlaufen. 300

Dem ist aber in der That nicht so. — So hat z. B. Neapel eine mittlere Jahreswärme von 15,3° C., während bei gleicher nördlicher Breite New-York nur eine mittlere Jahreswärme von 10,9° hat. Christiania und Quebec haben fast gleiche mittlere Jahreswärme, nämlich 5,3 und 5,5° C., und doch liegt Quebec um mehr als 13 Breitengrade südlicher als Christiania. Ebenso ist an einem und demselben Orte der Gang der Wärme von einem Jahre zum anderen sehr verschieden, und demselben Jahrestage entspricht keineswegs stets dieselbe Temperatur, wie es sein müßte, wenn die Luftwärme allein vom Sonnenstande abhinge. So war z. B. zu Frankfurt am Main — 17,5° C. die mittlere Temperatur des 22. Januar 1850, 10,6° C. die desselben Tages im Jahre 1846. — Im Jahre 1846 war zu Frankfurt am Main der 22. Januar um 2,5° C. wärmer als der 14. Mai. Ebendaselbst fiel im Jahre 1841 der heißeste Tag auf den 24. Mai mit 25° C., im Jahre 1842 aber auf den 19. August mit 26° C.

Solche Anomalien zeigen deutlich, wie sehr die Luftwärme außer von den Insolationsverhältnissen noch von anderen mächtig influierenden und veränderlichen Faktoren bedingt werde. Wenn am 22. Januar 1846 zu Frankfurt am Main eine Wärme von 10,5° C. herrschte, so konnte diese hohe Temperatur unmöglich direkt durch die Sonnenstrahlen hervorgerufen sein, und zwar um so weniger, als jener Tag ein durchaus bewölkter Regentag war; die damals herrschenden Südwestwinde hatten die Wärme offenbar aus südlicheren Gegenden

zugeführt; ebenso wie die verhältnismäßig niedrige Temperatur des 14. Mai nur das Resultat rauher Nordostwinde war.

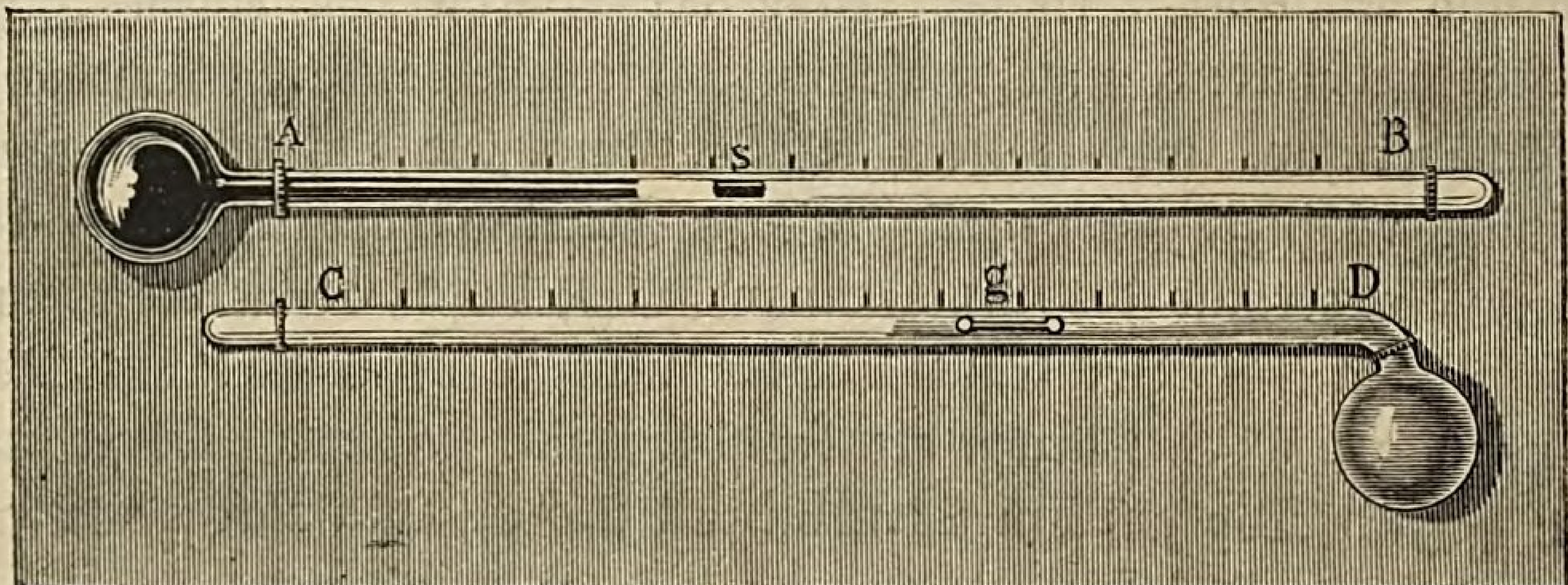
Aus alle dem geht hervor, daß die Temperaturverhältnisse eines Ortes nicht aus theoretischen Betrachtungen abgeleitet, sondern nur durch längere Zeit fortgesetzte Beobachtungen ermittelt werden können.

301 **Mittlere Temperatur der Tage, der Monate und des Jahres.** Wenn man von einer Mitternacht bis zur nächsten alle Stunden ein zweckmäßig aufgestelltes Thermometer beobachtet und aus den 24 Beobachtungen das Mittel nimmt, so erhält man die mittlere Temperatur des Tages.

Solche stündliche Beobachtungen einige Zeit lang mit ununterbrochener Regelmäßigkeit anzustellen, ist ungemein mühsam, selbst wenn sich mehrere Personen in das Geschäft teilen. Man hat deshalb andere Methoden in Vorschlag gebracht, um die mittlere Temperatur eines Jahres zu finden. Man erhält dieselbe z. B. sehr nahe richtig, wenn man um 7 Uhr Morgens, um 2 Uhr Nachmittags und um 9 Uhr abends die Lufttemperatur beobachtet und aus diesen drei Beobachtungen das Mittel zieht. Andere ganz passende Beobachtungsstunden, deren Mittel gleichfalls das Tagesmittel repräsentieren, sind 7 Uhr morgens und 7 Uhr abends. Endlich findet man auch das Tagesmittel, wenn man aus dem innerhalb 24 Stunden beobachteten Maximum und Minimum der Temperatur das Mittel nimmt.

Um die höchste und niedrigste Temperatur zu erfahren, welche innerhalb 24 Stunden geherrscht hat, ohne daß man deshalb gerade zur Zeit des Maximums und des Minimums das Thermometer zu beobachten braucht, kann man den Fig. 579 abgebildeten Thermometrographen von Rutherford (1794)

Fig. 579.



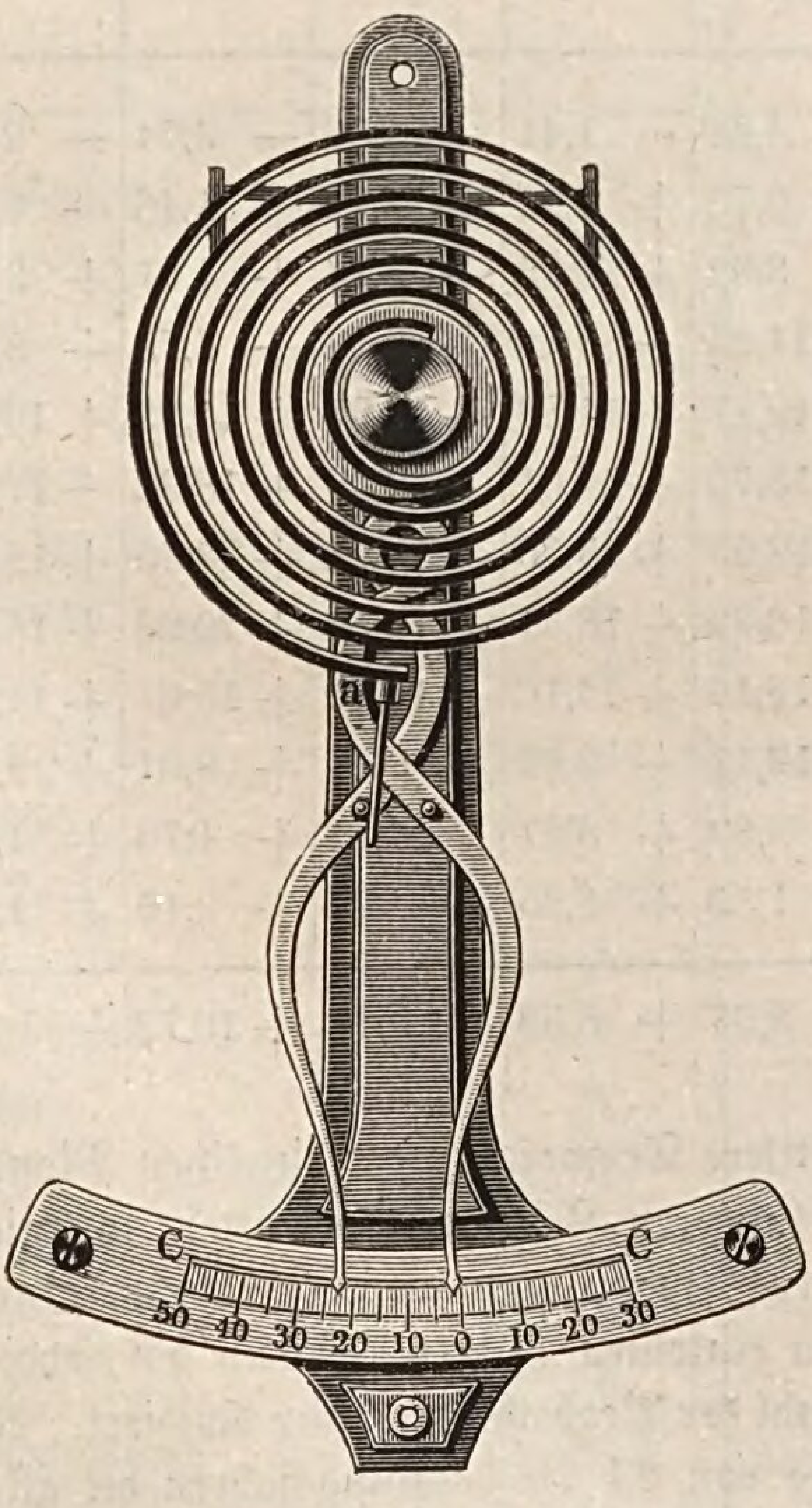
anwenden; er besteht aus zwei Thermometern, deren Röhren wagerecht liegen, und von denen das eine ein Quecksilberthermometer, das andere ein Weingeistthermometer ist. In der Röhre des Quecksilberthermometers liegt ein Stahlstiftchen, welches durch die Quecksilbersäule fortgeschoben wird, wenn sich das Quecksilber in der Kugel dieses Thermometers ausdehnt; wenn nun aber das Thermometer erkaltet, so zieht sich die Quecksilbersäule wieder zurück, das

Stahlstäbchen aber bleibt an der Stelle liegen, bis zu welcher es bei dem höchsten Stande des Thermometers geschoben worden war; ein solches Thermometer giebt also das Maximum der Temperatur an, welches innerhalb einer gewissen Periode geherrscht hat.

In der Röhre des Weingeistthermometers liegt ein ganz feines Glasstäbchen, welches an beiden Enden etwas dicker ist, wie man Fig. 579 deutlich sieht; das Glasstäbchen liegt noch in dem Weingeistsäulchen, und wenn der Weingeist in der Kugel erkaltet und sich die Weingeistsäule in der Röhre bis an das erste Knöpfchen des Glasstäbchens zurückgezogen hat, so wird bei fernerem Sinken der Temperatur das Glasstäbchen infolge der Adhäsion zwischen Weingeist und Glas von der noch weiter sich zurückziehenden Weingeistsäule mitgenommen; wenn aber die Flüssigkeit in der Kugel wieder wärmer wird, so geht beim Steigen des Thermometers die Flüssigkeit an dem Stäbchen vorbei, ohne es fortzuschieben; das Stäbchen, welches von dunkelfarbigem Glase gemacht sein muß, damit man es deutlich sehen kann, bleibt also an der Stelle liegen, welche dem Minimum der Temperatur entspricht, die innerhalb eines gewissen Zeitraumes herrschte.

Die Kugel des einen Thermometers liegt auf der rechten, die des anderen dagegen auf der linken Seite. Wenn man nun den ganzen Apparat etwas nach der linken Seite neigt und leise daran stößt, so fällt das Stahlstäbchen durch sein Gewicht bis auf die Quecksilbersäule, das Glasstäbchen aber bis an das Ende der Weingeistsäule. Wenn dann das so vorgerichtete Instrument wieder horizontal gestellt wird, so muß bei jedem Steigen der Temperatur das Stahlstäbchen fortgeschoben, das Glasstäbchen aber bei jedem Sinken der Temperatur zurückgezogen werden.

Fig. 580.



Das Rutherford'sche Instrument kommt jedoch leicht in Unordnung. Bei weitem zuverlässiger ist das Metallthermometer von Hermann und Pfister in Bern, welches durch Fig. 580 dargestellt ist. Dasselbe besteht aus einem spiralförmig gewundenen, im Mittelpunkte befestigten Stahlstreifen, auf dessen Innenseite der ganzen Länge nach ein Messingstreifen aufgelötet ist. Da sich nun das Messing bei einer Temperaturänderung mehr ausdehnt oder zusammenzieht als der Stahl, so muß die Spirale

bei steigender Temperatur sich erweitern, bei sinkender Temperatur dagegen sich verengern. Dadurch wird ein am unteren, freien Ende befindlicher Stift in Bewegung gesetzt und zwar nach links beim Steigen, nach rechts beim Sinken der Temperatur. Durch diesen Stift wird, wie aus der Figur zu ersehen ist, bald der eine, bald der andere der beiden Zeiger verschoben, welche in ihren äußersten Lagen stehen bleiben und so das Maximum und das Minimum der Temperatur erkennen lassen. Zu jeder neuen Einstellung werden die beiden Zeiger dem Stifte genähert, so daß ihre Spitzen sich decken. Die Graduierung des Instrumentes wird durch Vergleichung mit einem Quecksilberthermometer erhalten.

Hat man auf die eine oder andere Weise die mittlere Temperatur aller Tage eines Monats ermittelt, so erhält man die mittlere Temperatur des Monats, wenn man aus den 30 oder 31 Tagesmitteln wieder das Mittel nimmt.

Die aus den 12 Monatsmitteln gezogene Mittelzahl giebt dann die mittlere Temperatur des ganzen Jahres an.

So ergeben sich z. B. aus den zu Berlin angestellten Beobachtungen folgende Mittelwerte in Graden des hundertteiligen Thermometers für die Temperatur der einzelnen Monate und des ganzen Jahres von 1829 bis 1834:

	1829	1830	1831	1832	1833	1834	*D*
Januar	— 5,82	— 7,64	— 4,64	— 1,41	— 3,36	— 3,54	— 2,37
Februar	— 3,60	— 4,25	+ 0,75	+ 1,21	+ 2,21	+ 1,46	— 0,19
März	+ 1,72	+ 4,85	+ 3,92	+ 3,95	+ 3,76	+ 4,67	+ 3,42
April	+ 9,00	+ 10,51	+ 11,25	+ 9,00	+ 6,32	+ 7,75	+ 8,60
Mai	+ 11,86	+ 14,05	+ 12,47	+ 11,86	+ 17,97	+ 15,92	+ 13,65
Juni	+ 18,20	+ 17,51	+ 15,75	+ 17,01	+ 19,09	+ 18,96	+ 17,42
Juli	+ 19,29	+ 19,21	+ 19,25	+ 15,80	+ 18,24	+ 23,36	+ 18,80
August	+ 17,31	+ 17,71	+ 18,29	+ 18,31	+ 14,14	+ 20,96	+ 18,04
September . . .	+ 14,49	+ 13,98	+ 13,16	+ 13,16	+ 14,10	+ 15,61	+ 14,69
Oktober	+ 7,94	+ 9,10	+ 12,17	+ 9,52	+ 8,80	+ 9,61	+ 9,96
November . . .	+ 0,90	+ 5,90	+ 3,39	+ 3,27	+ 4,44	+ 4,76	+ 4,06
December . . .	— 8,66	— 0,59	+ 1,80	+ 1,35	+ 4,75	+ 2,10	+ 1,65
Jahr	+ 6,88	+ 8,46	+ 8,95	+ 8,58	+ 9,19	+ 10,72	+ 8,98

Hat man für einen Ort die mittlere Temperatur der einzelnen Monate und des ganzen Jahres während eines längeren Zeitraumes ermittelt, so ergiebt sich das allgemeine Monatsmittel, wenn man die Mitteltemperaturen desselben Monats, wie man sie in den einzelnen Jahren erhalten hat, addiert und die erhaltene Summe durch die Zahl der Beobachtungsjahre dividiert. Auf diese Weise haben sich aus einer Reihe von 24 Beobachtungsjahren die allge-

meinen Monatsmittel für Berlin ergeben, wie man sie in der letzten Kolumne obiger Tabelle unter *D* findet.

Auf gleiche Weise ergiebt sich das allgemeine Jahresmittel, welches für Berlin 8,98° C. ist.

Je länger die Beobachungsreihen fortgesetzt sind, desto richtiger werden die aus ihnen berechneten allgemeinen Monats- und Jahresmittel.

Jahresisothermen. Um den normalen Gang der Wärme für irgend einen Ort zu ermitteln, muß man durch möglichst lange fortgesetzte Beobachtungen das allgemeine Mittel der einzelnen Monate bestimmen, und um ein wahres Bild der Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche zu erhalten, muß man die Beobachtungsresultate der verschiedensten Weltgegenden zusammenstellen. Die Zahlen der folgenden Tabelle sind dem reichen Material entnommen, welches Dove gesammelt und in den Abhandlungen der Berliner Akademie veröffentlicht hat. Die Temperaturangaben der ursprünglichen Tabelle sind von Réaumur'schen Graden in solche nach der Centesimalskala umgerechnet worden. 302

	Geographische Breite	Mittlere Temperatur. des Jahres	des heißesten Monats	des kältesten Monats
Singapore	1° 17′	27,0° C.	28,0° C.	25,8° C.
Guinea	5 30	27,4	28,7	25,0
Batavia	6 9	25,8	26,6	23,8
Kouka	13 10	28,6	33,5	22,1
Calcutta	22 38	28,0	32,4	20,7
Rio Janeiro	22 54 S	23,2	26,7	19,5
Havanna	23 9	25,1	27,5	21,9
Cairo	30 2	22,2	29,9	12,9
Bermudas	32 30	19,6	24,9	13,8
Funchal	32 38	19,8	23,2	18,2
Kapstadt	33 56 S	19,1	24,4	14,3
Adelaide	34 35 S	20,2	29,1	12,4
Gibraltar	36 7	19,6	26,4	14,3
Algier	36 47	17,9	24,8	11,6
Peking	39 54	12,5	27,5	— 3,7
New-York	40 43	10,9	22,9	— 4,2
Neapel	40 52	15,2	23,7	8,1
Albany	42 39	9,0	22,2	— 4,5
Hobart-Town	42 53 S	11,4	18,2	4,5
Sebastopol	44 36	11,6	21,8	1,2

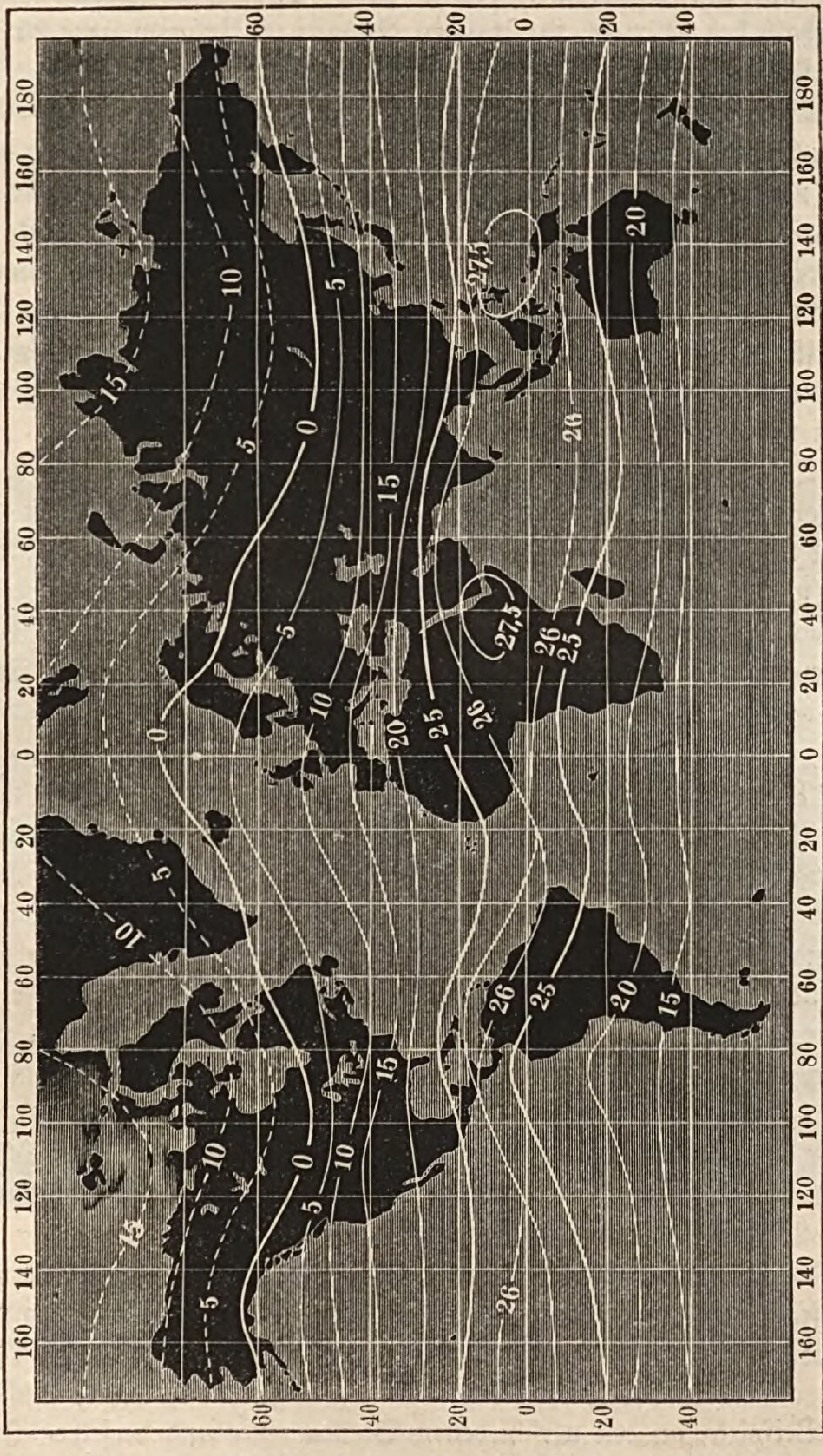
	Geographische Breite	Mittlere Temperatur des Jahres	des heißesten Monats	des kältesten Monats
Halifax	44° 39′	4,5° C.	21,1° C.	— 7,7
Bordeaux	44 50	13,9	22,9	5,0
Astrachan	46 21	12,2	25,4	— 10,8
Quebec	46 48	5,5	23,0	— 10,8
Fort Vancouver . . .	48 37	11,0	18,9	3,3
Paris	48 50	10,8	18,8	1,9
Frankfurt a. M. . . .	50 10	9,8	18,9	— 0,3
Brüssel	50 51	10,4	18,0	1,9
Breslau	51 3	8,2	18,5	— 2,2
Düsseldorf	51 14	11,0	19,1	1,7
London	51 30	10,4	17,5	2,8
Falklands Inseln . . .	52 0	8,5	12,7	3,0
Irkutsk	52 17	0,4	18,2	— 19,6
Berlin	52 30	9,0	18,8	— 2,4
Barnaul	53 20	— 0,4	19,7	— 20,8
Dublin	53 21	9,5	15,9	3,6
Moskau	55 45	4,5	19,1	— 10,2
Edinburg	55 58	8,4	14,9	3,0
Tübingen	48 31	8,2	17,7	— 1,8
Sitcha	57 3	7,5	14,4	1,2
Petersburg	59 56	4,2	17,6	— 10,5
Bergen	60 24	8,2	15,8	1,7
Jakutsk	62 1	— 10,3	20,3	— 43,0
Reikiavik	64 8	4,1	12,6	— 1,2
Torneo	66 24	— 0,5	16,4	— 15,9
Ustjansk	70 58	— 15,5	—	—
Nordcap	71 10	0,1	8,0	— 5,5
Insel Melville	74 47	— 18,1	5,7	— 35,1

Eine südliche Breite ist in dieser Tabelle durch S bezeichnet, wo dagegen keine weitere Bezeichnung beigefügt ist, ist von nördlicher Breite die Rede.

Eine klare Übersicht über die Verteilung der Wärme auf der Erde hat zuerst Humboldt durch seine isothermischen Linien möglich gemacht, durch welche er alle solche Orte derselben Hemisphäre verband, welche gleiche mittlere Jahrestemperatur haben.

Denken wir uns z. B., daß ein Naturforscher von Berlin aus eine Reise um die Erde in der Weise macht, daß er alle Orte der nördlichen Halbkugel besucht, welche dieselbe mittlere Jahreswärme haben wie Berlin, nämlich 9° C.,

Fig. 581.



so wird der Weg, den er auf diese Weise zurücklegt, eine *Linie gleicher mittlerer Jahreswärme*, also eine *isotherme Linie* sein; diese Linie

aber fällt nicht mit dem Breitenkreise von Berlin zusammen, sondern ist unregelmäßig gekrümmt, d. h. sie geht durch Orte, welche eine ganz andere Breite haben als Berlin.

Die Karte Fig. 581 (a. v. S.) stellt die Erdoberfläche in Äquatorial-Projektion mit den Isothermen von 5 zu 5° C. dar; außerdem befinden sich noch innerhalb des Gürtels, für welchen die mittlere Jahreswärme 25° C. übersteigt, die Kurven von 26 und 27,5° mittlerer Jahreswärme.

Die Betrachtung dieser Karte erspart uns eine weitere Beschreibung des Laufes der Isothermen. Man sieht, daß ihre Krümmungen in der nördlichen Halbkugel um so bedeutender werden, je weiter man sich vom Äquator entfernt; die Isotherme von 0° z. B. steigt von dem südlichen Ende der Küste von Labrador über Island bis zur geographischen Breite des Nordkaps, um sich im Innern von Asien wieder bedeutend zu senken.

Die südlichen Wendepunkte der Isothermen liegen im östlichen Nordamerika und im Innern von Asien, die nördlichen Wendepunkte dagegen liegen an den Westküsten von Europa und Amerika.

Die Temperaturverhältnisse der südlichen Hemisphäre sind uns bei weitem nicht so vollständig bekannt wie die der nördlichen, doch ist es wohl als ausgemacht zu betrachten, daß die südliche Halbkugel etwas kälter ist als die nördliche, was wohl daher rührt, daß auf der nördlichen das Land, auf der südlichen hingegen das Meer vorherrscht. Das feste Land erwärmt sich durch die Absorption der Sonnenstrahlen weit mehr als das Meer, welches einen großen Teil dieser Strahlen reflektiert.

303 **Isotheren und Isochimenen.** Daß nicht alle Orte, welche auf demselben Parallelkreise liegen, gleiches Klima haben, ist bereits angeführt worden, es fragt sich aber nun, ob denn alle Orte, welche auf derselben Isotherme liegen, alle Orte also, für welche die mittlere Jahreswärme gleich ist, auch sonst gleiche klimatische Verhältnisse haben. Man braucht nur die Tabelle auf Seite 581 und 582 anzusehen, um sich zu überzeugen, daß dies nicht der Fall ist. Edinburg und Tübingen haben gleiche mittlere Jahreswärme von 8,1 und 8,2°, in Edinburg ist aber die mittlere Temperatur des kältesten Monats 3,0, in Tübingen — 1,8°; Tübingen hat also einen weit kälteren Winter als Edinburg, dagegen ist die mittlere Temperatur des Juli für Tübingen 17,7°, für Edinburg nur 14,9°. Bei gleicher mittlerer Jahrestemperatur hat also Edinburg einen gelinderen Winter und einen kühleren Sommer als Tübingen.

Um die Wärmeverhältnisse eines Landes zu kennen, reicht es also nicht hin, daß man seine mittlere Jahrestemperatur kennt, man muß auch wissen, wie die Wärme auf die verschiedenen Jahreszeiten verteilt ist. Diese Verteilung kann man auf einer Isothermenkarte dadurch zeigen, daß man, nach Humboldt's Beispiele, an den verschiedenen Stellen einer und derselben Isotherme die mittlere Sommer- und Wintertemperatur beschreibt, was in unserer Isothermenkarte wegen ihrer Kleinheit nicht möglich war; man sieht alsdann bald, daß die Differenz zwischen der mittleren Sommer- und Wintertemperatur in der

Nähe der konvexen Wendepunkte der Isothermen am geringsten, dagegen in der Nähe der konkaven Wendepunkte am größten sind. Dieselben Ursachen also, welche bewirken, daß die Isothermen an den Westküsten von Europa und Amerika so hoch nach Norden steigen, dagegen im Innern von Nordamerika und von Asien so tief nach Süden sinken, machen auch die Differenz zwischen der Sommer- und Wintertemperatur geringer, beziehungsweise größer. Eine sehr gute Übersicht in Beziehung auf die Verteilung der Wärme zwischen Winter und Sommer gewährt eine Karte, in welcher man alle Orte durch Kurven verbindet, welche gleiche mittlere Wintertemperatur, und diejenigen, welche gleiche mittlere Sommertemperatur haben. Die Linien gleicher mittlerer Wintertemperatur heißen Isochimenen, die Linien gleicher mittlerer Sommertemperatur heißen Isotheren. Fig. 582 stellt ein Kärtchen von Europa mit den Isotheren und den Isochimenen von 5 zu 5° C. dar.

Die ausgezogenen Kurven sind die Isochimenen, die punktierten sind die Isotheren. Man sieht aus dieser Karte leicht, daß die Westküste des süd-

Fig. 582.



lichen Teiles von Norwegen, Dänemark, ein Teil von Böhmen und Ungarn, Siebenbürgen, Bessarabien und die Südspitze der Halbinsel Krim gleiche mittlere Wintertemperatur von 0° haben. Böhmen hat aber einen gleichen Sommer mit dem Ausflusse der Garonne, und in der Krim ist der Sommer noch weit wärmer. Dublin hat gleiche mittlere Wintertemperatur, nämlich 5°, mit Nantes, Oberitalien und Konstantinopel, und gleiche mittlere Sommerwärme mit Drontheim und Finnland.

Die Isothere von 20° geht von dem Ausflusse der Garonne ungefähr

über Straßburg und Würzburg nach Böhmen, der Ukraine, dem Lande der Donischen Kosacken und geht etwas nördlich vom Kaspischen Meere vorbei; wie ungleich ist aber die mittlere Wintertemperatur an verschiedenen Orten dieser Isothere! An der Westküste von Frankreich ist sie 5°, in Böhmen 0°, in der Ukraine — 5° und etwas nördlich vom Kaspischen Meere gar — 10°.

304 **Land- und Seeklima.** Die Betrachtung der letzten Karte und der Tabelle auf Seite 581 und 582 führt uns zu der wichtigen Unterscheidung zwischen Land- und Seeklima oder, wie man es auch ausdrückt, zwischen *Kontinental-* und *Küstenklima*. Die Differenzen zwischen der Sommer- und Wintertemperatur wachsen mit der Entfernung vom Meere; an den Meeresküsten herrschen kühle Sommer und milde Winter, im Innern des Landes heiße Sommer und kalte Winter. Diese Differenzen treten sehr lebhaft hervor, wenn man die Temperaturverhältnisse der Westküsten von Europa mit denen des nördlichen Asiens vergleicht. Um das Verhältnis der mittleren Jahreswärme zu der Verteilung der Wärme leicht übersehen zu können, ist in den folgenden, der Tabelle S. 581 entnommenen Beispielen die mittlere Jahreswärme *vor*, die mittlere Wärme des heißesten Monats *über*, die mittlere Temperatur des kältesten Monats *unter* einen Horizontalstrich gesetzt.

Küstenklima:		*Kontinentalklima:*	
Nordkap 0,1	$\frac{8,0}{-\,5,5}$	Jakutzk . . . . — 10,3	$\frac{20,3}{-\,43,0}$
Reikiavik 4,1	$\frac{12,9}{-\,1,2}$	Irkutzk 0,4	$\frac{18,2}{-\,19,6}$
		Moskau 4,5	$\frac{19,1}{-\,10,2}$

Welchen Einfluß solche klimatische Verschiedenheiten auf die Vegetation ausüben müssen, ist klar. An mehreren Orten Sibiriens, in Jakutzk z. B., wo die mittlere Jahrestemperatur — 10,3° ist, die mittlere Januartemperatur aber — 43,0° beträgt, wird während des kurzen, aber heißen Sommers Gerste und Roggen auf einem Boden gebaut, welcher in einer Tiefe von 3 Fuß beständig gefroren bleibt; dagegen ist auf der Insel Island bei ungleich höherer Jahrestemperatur und bei einer unbedeutenden Winterkälte an den Bau von Cerealien nicht mehr zu denken, weil die niedrige Sommertemperatur nicht hinreicht, sie zur Reife zu bringen.

Im nordöstlichen Irland, wo im Winter kaum Eis friert, in gleicher Breite mit Königsberg, gedeiht die Myrthe so kräftig wie in Portugal; auf den Küsten von Devonshire überwintert die Camelia japonica und die Fuchsia coccinea im Freien; der Winter ist in Plymouth nicht kälter als in Florenz und Montpellier; der Weinbau gedeiht aber nicht in England, weil die Rebe, die wohl eine ziemlich starke Winterkälte vertragen kann, eines heißen Sommers bedarf, wenn die Trauben reifen und einen trinkbaren Wein liefern sollen.

Diese Unterschiede rühren daher, daß das feste Land, welches die Wärme-

strahlen leichter absorbiert und ausstrahlt, sich schneller erwärmt und leichter wieder erkaltet, als das Meer, welches, überall von gleichförmiger Natur, wegen seiner Durchsichtigkeit und wegen der bedeutenden specifischen Wärme des Wassers nicht so schnell erwärmt wird, die einmal erlangte Wärme aber auch nicht so schnell abgiebt. Die Temperatur der Meeresoberfläche ist deshalb weit gleichförmiger; sowohl die täglichen als auch die jährlichen Temperaturschwankungen sind ungleich geringer als in der Mitte der großen Kontinente, und dadurch ist gerade der schon oben erwähnte Unterschied zwischen Land- und Seeklima bedingt, welcher dadurch noch größer wird, daß an den Küsten der nördlich gelegenen Länder der Himmel meistens bedeckt ist, was sowohl den wärmenden Einfluß der Sonnenstrahlen im Sommer mäßigt als auch die starke Erkaltung des Bodens durch Wärmestrahlung im Winter hindert.

Ursachen der Biegung der Isothermen. Die wichtigsten Ursachen, welche bewirken, daß die Isothermen an den Westküsten von Europa und Amerika so stark nach Norden sich biegen, sind im wesentlichen folgende: 305

In der nördlichen gemäßigten Zone sind die Südwest- und Nordostwinde die vorherrschenden. Der Südwestwind kommt aus den Äquatorialgegenden und führt die Wärme der Tropen zum Teil nach den kälteren Ländern; dieser erwärmende Einfluß der Südwestwinde wird aber in solchen Ländern vorzugsweise merklich werden, welche der südwestlichen Luftströmung am meisten ausgesetzt sind, und somit erklärt sich, daß die Westküsten der großen Kontinente wärmer sind als die Ostküsten, daß die Isothermen in Europa, welches eigentlich nur eine halbinselförmige Verlängerung des asiatischen Kontinents ist, und an den Westküsten von Nordamerika weiter nach Norden steigen als im Innern von Asien und an den Ostküsten von Nordamerika.

Endlich trägt eine unter dem Namen des Golfstromes bekannte Meeresströmung sehr zur Milderung des europäischen Klimas bei. Der Ursprung dieses Stromes ist im mexikanischen Meerbusen zu suchen, wo das Meerwasser bis zu einer Temperatur von 30° C. erwärmt wird. Zwischen Cuba und Florida aus dem mexikanischen Meerbusen heraustretend, folgt der Strom anfangs den amerikanischen Küsten, um sich dann mit stets zunehmender Breite und abnehmender Temperatur östlich nach Europa hinzuwenden. Wenn auch der Golfstrom selbst nicht bis an die Küsten von Europa reicht, so verbreitet sich doch sein warmes Wasser, namentlich unter dem Einflusse der vorherrschenden Südwestwinde, in den europäischen Gewässern, was schon daraus hervorgeht, daß man an den westlichen Küsten von Irland und an den Küsten von Norwegen Früchte von Bäumen findet, die in der heißen Zone Amerikas wachsen; die West- und Südwestwinde bleiben also lange mit einem Meerwasser in Berührung, dessen Temperatur zwischen dem 45. und 50. Breitengrade selbst im Januar nicht unter 9 bis 10° C. sinkt. Unter dem Einfluß dieses Golfstromes ist das nördliche Europa durch ein eisfreies Meer von dem Gürtel des Polareises getrennt; selbst in der kältesten Jahreszeit erreicht die Grenze des Polareises nicht die europäischen Küsten.

Während so alle Umstände zusammenwirken, um die Temperatur in Europa zu erhöhen, wirken im nördlichen Asien mehrere Ursachen zusammen, um die Isothermen bedeutend herabzusenken. Die warmen Luftströme, welche, aus dem Becken des indischen Oceans aufsteigend, die Wärme der Tropen dem inneren und nördlichen Asien zuführen könnten, werden durch die ungeheuren Gebirgsketten im Süden von Asien aufgehalten, während das nach Norden hin allmählich sich verflachende Land den Nord- und den Nordostwinden preisgegeben ist. Während sich Europa nicht weit nach Norden erstreckt, ragt Asien weit in das nördliche Eismeer hinein, welches hier, allen wärmenden Einflüssen entzogen, durch welche die Temperatur der europäischen Meere erhöht wird, fast immer mit Eis bedeckt ist. Überall reichen die Nordküsten von Asien bis an die Wintergrenze des Polareises, und die Sommergrenze dieses Eises entfernt sich nur auf kurze Zeit an einigen Stellen von den Küsten; daß aber dieser Umstand die Temperatur bedeutend erniedrigen muß, ist klar, wenn man bedenkt, wie viel Wärme bei der Schmelzung solcher Eismassen gebunden wird.

Die bedeutende Senkung der Isothermen im Innern und an den Ostküsten von Nordamerika rührt zum Teil daher, daß die Südwestwinde hier nicht mehr Seewinde, sondern Landwinde sind, und deshalb hier nicht mehr den mildernden Einfluß ausüben können wie auf den Westküsten. Während die europäischen Küsten vom wärmenden Wasser bespült sind, ziehen sich an den Ostküsten von Nordamerika kalte Meeresströmungen von Norden nach Süden. Eine solche Strömung, von Spitzbergen herkommend, geht zwischen Island und Grönland hindurch und vereinigt sich dann mit den aus der Hudsons- und Baffinsbai kommenden Strömungen, um an der Küste von Labrador herab, bei Neufoundland vorbeizutreiben und sich unter dem 44. Breitengrade unter den Golfstrom zu ergießen. Die arktische Strömung trägt die Kälte der Polarregionen teils durch die niedrige Temperatur des Wassers, größtenteils aber durch die schwimmenden Eisberge in die südlicheren Gegenden, und so ist diese Strömung ein Hauptgrund der bedeutenden Senkung der Isothermen an den Ostküsten von Amerika.

306 **Temperatur des Bodens.** Wir hatten bisher immer nur die Temperatur der Luft, aber nicht die Temperatur der oberen Bodenschichten besprochen, welche je nach der Natur der Bodenfläche oft bedeutend von der Lufttemperatur verschieden sein kann; ein nackter, des Pflanzenwuchses beraubter steiniger oder sandiger Boden wird durch die Absorption der Sonnenstrahlen weit heißer, ein mit Pflanzen bedeckter Boden, z. B. ein Wiesengrund, wird durch die nächtliche Strahlung weit kälter als die Luft, deren Temperatur schon durch die fortwährenden Luftströmungen mehr ausgeglichen wird. In den afrikanischen Wüsten steigt die Hitze des Sandes oft auf 50 bis 60° C. Ein mit Pflanzen bedeckter Boden bleibt kühler, weil die Sonnenstrahlen ihn nicht direkt treffen können; die Pflanzen selbst binden gewissermaßen eine bedeutende Wärmemenge, indem durch die Vegetation eine Menge Wasser verdunstet; sie erkalten aber auch, wie wir bald näher sehen werden, wenn wir die Taubildung betrachten, bei

ihrem großen Emissionsvermögen durch Ausstrahlung der Wärme so stark, daß die Temperatur des Grases oft 8 bis 11° unter die Temperatur der Luft sinkt. Im Innern der Wälder ist die Luft beständig kühl, weil die dichte Laubdecke auf dieselbe Weise abkühlend wirkt wie eine Grasdecke, und weil die an den Gipfeln der Bäume abgekühlte Luft sich niedersenkt.

Wegen des unvollkommenen Wärmeleitungsvermögens kann die Wärme der obersten Bodenschichten nur nach und nach in das Innere eindringen; wenn die Oberfläche aber erkaltet, so verlieren die tieferen Bodenschichten weniger schnell ihre Wärme; in einer geringen Tiefe werden deshalb die Temperaturschwankungen weit geringer sein als an der Oberfläche selbst. In Deutschland verschwinden bei einer Tiefe von 6 dm die täglichen Temperaturschwankungen, und in einer Tiefe von 24 m verschwinden sogar die jährlichen Variationen, so daß hier beständig eine Temperatur herrscht, welche nur wenig von der mittleren Temperatur des Ortes abweicht.

Obgleich alle Wärme auf der Oberfläche der Erde nur von der Sonne kommt, so hat doch die Erde auch eine ihr eigentümliche Wärme, wie aus der Temperaturzunahme folgt, welche man in großen Tiefen beobachtet hat. Wenn die Wärme nach dem Mittelpunkte der Erde hin auch in größere Tiefe noch in dem Maße zunähme, welches uns die Beobachtungen zeigen, so müßte schon in einer Tiefe von 3000 m die Temperatur des siedenden Wassers herrschen, im Mittelpunkte der Erde aber müßten alle Körper glühend sein und im geschmolzenen Zustande sich befinden. Daß wir von dieser ungeheuren Hitze im Innern der Erde auf der Oberfläche nichts merken, läßt sich durch das schlechte Leitungsvermögen der erkalteten Erdkruste erklären, welche diesen glühenden Kern einschließt.

Die meisten wasserreichen Quellen haben eine Temperatur, welche sich in den verschiedenen Jahreszeiten nur sehr wenig ändert; in unserer Hemisphäre erreichen sie meistens ihre höchste Temperatur im September, die niedrigste im März, die Differenz ihrer höchsten und ihrer niedrigsten Temperatur beträgt in der Regel nur 1 bis 2°.

Quellen, welche aus größeren Tiefen kommen, haben eine weit höhere Temperatur, wie dies bei vielen Salzquellen und sonstigen Mineralquellen der Fall ist. Das Wasser mancher Quellen hat fast die Temperatur des Siedpunktes.

Abnahme der Temperatur in den höheren Luftregionen. Die Erwärmung der Luft hat zwei Ursachen; zunächst absorbiert sie einen Teil der von der Sonne kommenden Wärmestrahlen; weil aber die Luft die Wärmestrahlen ungleich weniger absorbiert als die Erdoberfläche, so ist auch die Erwärmung der Luft durch die Absorption der Wärmestrahlen ungleich geringer als die Erwärmung des Bodens; den bedeutendsten Anteil ihrer Wärme erhält die Atmosphäre von unten her. 307

Wäre die Luft keine elastische Flüssigkeit, bliebe die Dichtigkeit der Atmosphäre für alle Höhen dieselbe, so würden die am Boden erwärmten Luftschichten

bis an die Grenze der Atmosphäre steigen, die obersten Schichten des Luftmeeres, welches unsere Erde einhüllt, würden auch die wärmsten sein. Weil sich aber die warmen Luftschichten bei ihrem Aufsteigen ausdehnen, so wird bei dieser Ausdehnung Wärme gebunden, ihre Temperatur muß sinken, und so kommt es, daß die höheren Luftschichten kälter sind als die tieferen.

Daß eine solche Abnahme der Temperatur in den höheren Luftregionen wirklich stattfindet, davon überzeugt man sich, wenn man zu diesen höheren Regionen aufsteigt, mag man sich nun in einem Luftballon erheben oder den Gipfel hoher Berge besteigen.

In den Alpen entspricht im Durchschnitt eine Erhebung von 150 m einer Temperaturerniedrigung von 1°.

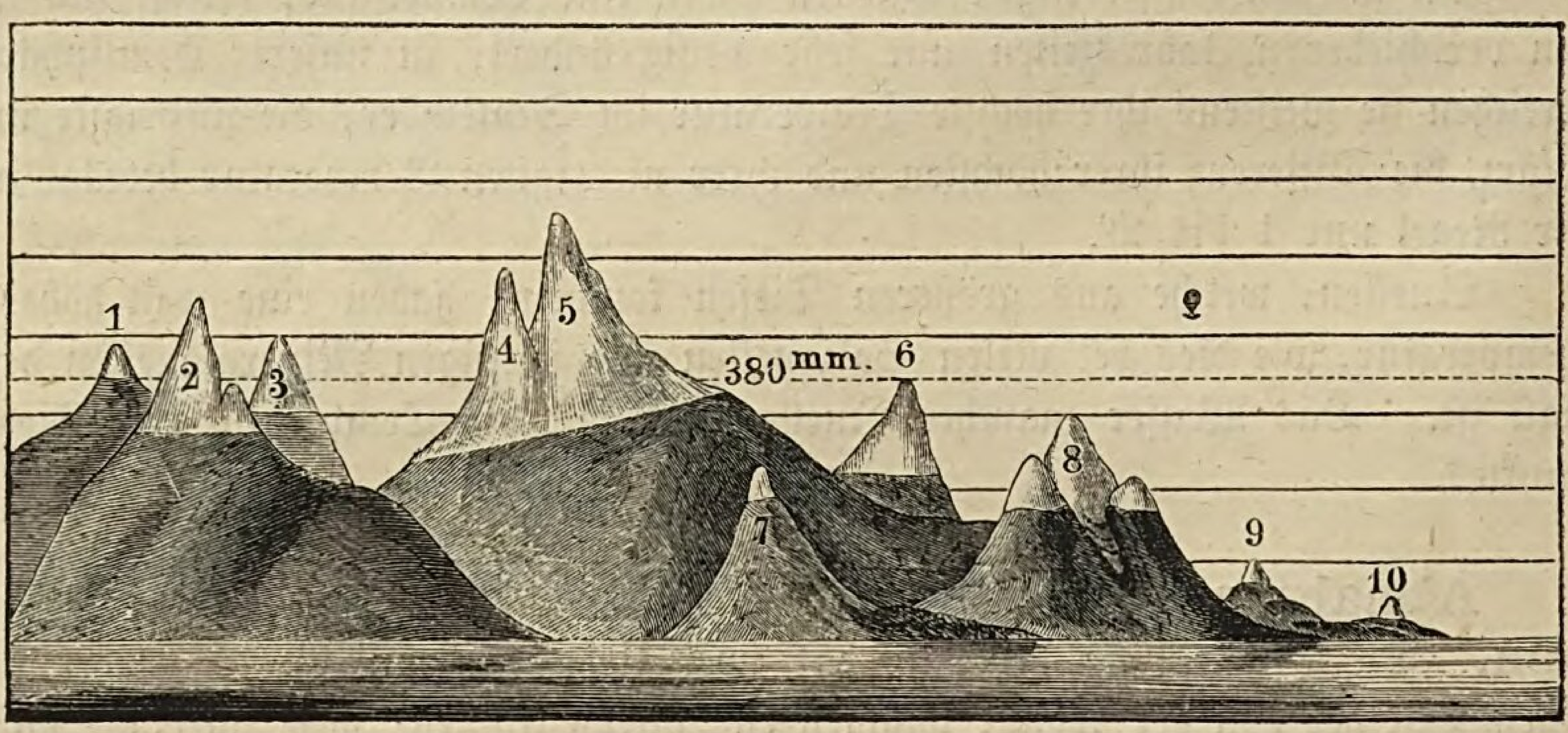
Eine Folge der mit der Höhe abnehmenden Temperatur ist, daß die Gipfel hoher Berge stets mit Schnee bedeckt sind.

Die Grenze des ewigen Schnees liegt natürlich um so höher, je mehr man sich der heißen Zone nähert. Die Höhe der Schneegrenze ist für

die Küsten von Norwegen . .	720 m
Island	936 „
Alpen	2708 „
Ätna	2905 „
Himalaya	4500 „
Mexiko	4500 „
Quito	4800 „

Fig. 583 stellt die Höhenverhältnisse der Schneegrenze in verschiedenen Gegenden dar, und zwar sind Nr. 1, 2 und 3 der Illimani, der Aconcagua

Fig. 583.



und der Chimborazzo in Südamerika; 4, 5 und 6 der Schamalari, der Dhawalagiri und der Kaukasus in Asien. Nr. 7 stellt die Pyrenäen und 8 die Alpen dar, Nr. 9 den Sulitelma in Norwegen und Nr. 10 die Insel Magerö.

Zweites Kapitel.

Die Atmosphäre, ihr Druck und ihre Strömungen.

Die Lufthülle der Erde. Die feste, zum Teil mit Wasser bedeckte Erdkugel ist mit einer gasförmigen Hülle umgeben, welche man mit dem Namen der Atmosphäre bezeichnet. Das Gasgemenge, aus welchem die Atmosphäre besteht, nennt man die Luft. 308

Die Hauptbestandteile der atmosphärischen Luft sind Sauerstoff und Stickstoff, deren Gemisch noch verhältnismäßig geringe Quantitäten von Kohlensäure und Wasserdampf beigemengt sind. In 100 Raumteilen Luft sind 79 Raumteile Stickstoff und 21 Raumteile Sauerstoff enthalten. Dieses Verhältnis ist fast ganz konstant. Der Gehalt an Kohlensäure ist an und für sich sehr gering, unterliegt aber verhältnismäßig größeren Schwankungen als Sauerstoff und Stickstoff, indem 10 000 Raumteile Luft zwischen 3,3 und 5,3 Raumteile Kohlensäure enthalten. Noch veränderlicher ist der Gehalt an Wasserdampf, wovon im folgenden Kapitel ausführlicher die Rede sein wird.

Die Luft ist, wie wir früher schon gesehen haben, der Schwere eben so unterworfen wie die festen und tropfbar-flüssigen Körper. Die Luftteilchen werden also von der Masse des Erdkörpers angezogen und dadurch auch verhindert, sich von der Erde aus in den Weltraum zu zerstreuen. Durch ihre Schwere wird die Atmosphäre zu einem integrierenden Teile der Erde, sie nimmt Teil sowohl an ihrer jährlichen wie an ihrer täglichen Bewegung.

Weil die Luft expansibel ist und das Volumen, welches eine gegebene Luftmenge einnimmt, von dem Drucke abhängt, welchem sie ausgesetzt ist, so ist klar, daß die Atmosphäre nicht überall gleiche Dichtigkeit haben kann, daß dieselbe vielmehr von unten nach oben fortwährend abnehmen muß.

Daß die tieferen Luftschichten wirklich einen stärkeren Druck auszuhalten haben, das beweisen uns die in verschiedenen Höhen angestellten Barometerbeobachtungen. Am Meeresufer ist die Höhe der Barometersäule im Mittel 760 mm; sobald man sich aber über den Meeresspiegel erhebt, sinkt das Barometer um so mehr, je höher man steigt; zu Potosi, in einer Höhe von 4300 m, ist der mittlere Barometerstand nur noch 471 mm; in jener Höhe ist also der Luftdruck nur noch 0,62 von demjenigen, welcher am Ufer des Meeres stattfindet.

In Fig. 583 auf Seite 590 ist durch eine punktierte Linie die Höhe angedeutet, in welcher der Luftdruck nur noch halb so groß ist als am Spiegel des Meeres. Diese Linie streift den Gipfel des Kaukasus.

Da mit der Erhebung über den Meeresspiegel der Luftdruck abnimmt und das Barometer sinkt, so kann das Barometer dienen, um Höhenmessungen auszuführen. Näheres über diesen Gegenstand in §. 14, S. 44 des Supplementbandes.

Mit Hülfe der für barometrische Höhenmessungen konstruierten Formeln kann man berechnen, wie groß der Luftdruck einer jeden beliebigen Höhe über dem Meere ist; für eine Höhe von 8 geographischen Meilen ergiebt sich auf diese Weise ein Luftdruck, welcher so gering ist, daß er nur noch einer Quecksilbersäule von 1 mm das Gleichgewicht halten kann; in jener Höhe ist also die Dichtigkeit der Luft nur noch $^1/_{760}$ von der auf der Oberfläche des Meeres beobachteten. In einer Höhe von 10 bis 12 geographischen Meilen ist demnach die Luft schon so verdünnt, daß ihr Druck selbst für die empfindlichsten physikalischen Instrumente kaum bemerkbar ist. Was von Luft über die Höhe von 10 bis 12 geographischen Meilen hinausgeht, ist jedenfalls ein verschwindend kleiner Bruchteil der übrigen Atmosphäre, und deshalb nimmt man in der Regel an, daß die Atmosphäre eine Höhe von 10 bis 12 geographischen Meilen habe.

Eben weil die Luft expansibel ist, kann sie nicht eine scharfe obere Grenze haben wie die Gewässer, welche die Erdoberfläche bedecken. Es findet eben in den höheren Luftregionen ein allmählicher Übergang zur unendlichen Verdünnung statt, und deshalb ist auch die Höhe der Atmosphäre keine absolut gegebene und präcis bestimmbare; man kann höchstens sagen, in welcher Höhe die Dichtigkeit der Luft unmerklich wird.

Nehmen wir in diesem Sinne die Höhe der Atmosphäre zu 10 bis 12 geographischen Meilen an, so sehen wir, daß diese Höhe sehr gering ist im Vergleich zum Durchmesser der Erde, welcher nahe 1700 geographische Meilen beträgt. Um sich ein klares Bild von dem Verhältnisse der Erdkugel zu ihrer Atmosphäre zu machen, denke man sich eine Kugel von 1 m Durchmesser, welche von einer nicht ganz 6 mm dicken Lufthülle umgeben ist.

Aber weit unter der angegebenen Grenze verschwindet die letzte Spur des organischen Lebens, welches weder eine solche Luftverdünnung, noch eine so niedrige Temperatur ertragen kann, wie sie in jenen Höhen herrscht, und welches schwerlich bis auf die Gipfel der höchsten Berge hinaufsteigt.

Variationen des Barometerstandes. Wir haben schon oben gesehen, daß der Luftdruck durch das Barometer gemessen wird. Nun aber beobachtet man beständige Schwankungen an diesem Instrumente, was eine beständige Ab- und Zunahme des Luftdruckes andeutet. 309

Die Variationen des Barometers sind entweder periodische oder zufällige.

Die periodischen Schwankungen treten in den Tropen sehr entschieden auf; das Barometer fällt von 10 Uhr morgens bis 4 Uhr nachmittags, steigt dann bis 11 Uhr nachts, fällt wieder bis 4 Uhr morgens und steigt abermals bis 10 Uhr morgens. Der Barometerstand zeigt also zwei tägliche Maxima um 10 Uhr morgens und um 11 Uhr nachts, und zwei Minima um 4 Uhr morgens und um 4 Uhr abends.

Die Größe dieser täglichen Schwankungen beträgt ungefähr 2 mm.

Auch eine jährliche Periode der Barometerschwankungen zeigt sich in den Tropen ganz entschieden. Das Barometer sinkt nördlich vom Äquator vom Januar bis zum Juli und steigt dann wieder vom Juli bis zum Januar. Im Juli ist der mittlere Barometerstand 2 bis 4 mm niedriger als im Januar.

In höheren Breiten sind die zufälligen Schwankungen des Barometers so bedeutend, daß durch sie die hier sehr geringen periodischen Schwankungen ganz verdeckt werden. Um entscheiden zu können, ob mitten in den beständig stattfindenden zufälligen Schwankungen des Barometers sich nicht auch ein periodisches Steigen und Fallen geltend mache, muß man die Mittelzahlen einer großen Reihe von Barometerbeobachtungen mit einander vergleichen, welche regelmäßig zu bestimmten Stunden des Tages angestellt worden sind. Wenn man mehrere Monate lang das Barometer an mehreren bestimmten Stunden des Tages beobachtet und das Mittel aus allen zu derselben Stunde gemachten Beobachtungen nimmt, so reicht dies hin, um die Existenz einer täglichen Periode der Barometerschwankungen auch für unsere Gegenden nachzuweisen.

Solche Beobachtungen haben nun gezeigt, daß allerdings auch bei uns periodische Schwankungen stattfinden. Um 9 Uhr morgens steht in unseren Gegenden das Barometer im Durchschnitt um 0,7 mm höher als um 2 Uhr nachmittags; auch ist der mittlere Barometerstand des Sommers etwas niedriger als der des Winters.

Ursachen der Barometerschwankungen. Die Ursache aller Barometerschwankungen ist in der ungleichen und stets sich ändernden Wärmeverteilung auf der Erde zu suchen. Da sich die Wärmeverteilung auf der Erde beständig ändert, so wird auch das Gleichgewicht der Atmosphäre in jedem Augenblicke gestört; es entstehen Luftströmungen, welche das gestörte Gleichgewicht wieder herzustellen streben. Und so ist denn die Luft in beständiger Bewegung, bald mehr erwärmt und deshalb leichter, bald wieder erkaltet und deshalb dichter; bald mehr, bald weniger Wasserdampf enthaltend, wird auch die Luftsäule fortwährenden Veränderungen hinsichtlich ihres Druckes unterworfen sein, welche uns das Barometer anzeigt. 310

Daß wirklich Temperaturveränderungen die Ursache der Barometerschwan-

kungen sind, geht schon daraus hervor, daß sie in den Tropen, wo die Temperatur so wenig veränderlich ist, auch am unbedeutendsten sind. In höheren Breiten dagegen, wo die Variationen der Temperatur immer bedeutender werden, da ist auch die Amplitude der zufälligen Barometerschwankungen sehr groß; ja selbst im Sommer, wo die Temperatur im allgemeinen weniger veränderlich ist, sind die Oscillationen des Barometers kleiner als im Winter.

Obgleich man im allgemeinen nachweisen kann, daß die ungleiche und stets sich ändernde Erwärmung der Luft beständige Veränderungen in der Größe des Luftdrucks zur Folge haben muß, so sind wir doch noch weit davon entfernt, alle konkreten Fälle stets genügend ableiten zu können.

Wenn an irgend einem Orte die Luft bedeutend erwärmt wird, so dehnt sie sich aus und die Luftsäule erhebt sich über die Luftmasse, welche auf den kälteren Umgebungen ruht; die in die Höhe gestiegene Luft wird also oben nach den Seiten hin abfließen, der Druck der Luft muß also an dem wärmeren Orte abnehmen: das Barometer wird daselbst sinken müssen. In den kälteren Umgebungen aber muß das Barometer steigen, weil sich die in den oberen Regionen der erwärmten Gegenden seitwärts abfließende Luft über die Atmosphäre der kälteren Gegenden verbreitet.

Dadurch erklärt sich auch, warum in unseren Gegenden im Durchschnitte bei Südwestwinden das Barometer am tiefsten, bei Nordostwinden am höchsten steht: die Südwestwinde bringen uns warme Luft, während uns die Nordostwinde kältere Luft zuführen; da, wo ein warmer Luftstrom weht, müßte die Atmosphäre eine größere Höhe haben als da, wo der kalte Wind weht, wenn der Druck der ganzen Luftsäule an beiden Orten derselbe sein sollte; wäre dies aber auch wirklich der Fall, so würde die Luft des warmen Stromes oben abfließen, das Barometer also unter dem warmen Luftstrome sinken, unter dem kalten dagegen steigen.

In Europa sind im Durchschnitt die Südwestwinde auch die Regenwinde, weil sie von wärmeren Meeren kommend, mit Wasserdampf gesättigt sind, welcher sich nach und nach verdichtet und als Regen niederfällt, wenn der Wind in immer kältere Gegenden gelangt. In dieser Kondensation des Wasserdampfes ist ein zweiter Grund zu suchen, warum das Barometer bei Südwestwinden niedrig steht. So lange nämlich der Wasserdampf als förmliches Gas einen Bestandteil der Atmosphäre ausmacht, ist ihm ein Teil des atmosphärischen Druckes zuzuschreiben, ein Teil der Quecksilbersäule im Barometer wird durch den Wasserdampf getragen; das Barometer muß also sinken, wenn der Wasserdampf aus der Atmosphäre durch Verdichtung ausgeschieden wird.

Da die Südwestwinde, welche in unseren Gegenden ein Sinken des Barometers bewirken, uns auch eine feuchte Luft zuführen und regnerisches Wetter bringen, während das Barometer steigt, wenn Nordostwinde wehen, welche die Luft trocken und den Himmel heiter machen, so kann man allerdings sagen, daß im allgemeinen ein hoher Barometerstand schönes Wetter, ein tiefer aber schlechtes Wetter anzeigt. Dies ist aber, wie gesagt, nur eine Durchschnittsregel, denn bei Nordostwind ist der Himmel oft auch bewölkt, bei Südwest-

wind auch manchmal heiter; sie ist jedoch in derselben Ausdehnung richtig wie die, daß bei Nordostwind das Barometer hoch, bei Südwestwind dagegen tief steht; dies ist auch nicht immer, sondern nur im Durchschnitt der Fall. Wir können uns von solchen Anomalien nicht immer genügende Rechenschaft geben, weil uns die mannigfachen Elemente nicht genügend bekannt sind, welche den Gleichgewichtszustand der Atmosphäre bedingen.

Daß ein hoher Barometerstand im allgemeinen heiteres Wetter, ein tiefer aber trübes Wetter anzeigt, ist auch nur für solche Orte richtig, an welchen die warmen Winde zugleich die Regen bringenden sind. An dem Ausflusse des La-Plata-Stromes z. B. sind die kalten Südostwinde, welche vom Meere her wehen und das Barometer steigen machen, die Regenwinde, die warmen Nordwestwinde aber, bei welchen das Barometer sinkt, sind trockne Landwinde und bringen heiteres Wetter. Dem Umstande, daß hier der Regen durch kalte Winde gebracht wird, ist die geringere Regenmenge dieser Gegenden zuzuschreiben, während unter gleicher Breite an den Westküsten von Südamerika sehr viel Regen fällt, indem hier der warme Norwestdwind zugleich ein Seewind ist.

Entstehung der Winde. Wie bei dem auf S. 502 beschriebenen Versuch im kleinen die ungleiche Erwärmung der beiden Räume Luftströmungen veranlaßt, so ist auch die ungleiche stets wechselnde Erwärmung der Erdoberfläche und des über ihr schwebenden Luftmeeres die Ursache der Luftströmungen, die wir W i n d e nennen. Auch im großen sieht man die Luft in den stärker erwärmten Gegenden aufsteigen und in der Höhe nach den kälteren abfließen, während unten die Luft von den kälteren Gegenden den wärmeren zuströmt. 311

Ein einfaches Beispiel geben uns die Land- und Seewinde, welche man häufig an den Meeresküsten, namentlich aber auf den Inseln wahrnimmt. Einige Stunden nach Sonnenaufgang erhebt sich ein von dem Meere nach der Küste gerichteter Wind, der S e e w i n d, weil das feste Land unter dem Einflusse der Sonnenstrahlen stärker erwärmt wird als das Meer; über dem Lande steigt die Luft in die Höhe und fließt oben nach dem Meere hin ab, während unten die Luft vom Meere gegen die Küsten strömt. Dieser Seewind ist anfangs schwach und nur an den Küsten selbst fühlbar, später nimmt er zu und zeigt sich dann auch auf dem Meere schon in größerer Entfernung von der Küste; zwischen 2 und 3 Uhr nachmittags wird er am stärksten, nimmt dann wieder ab, und gegen Untergang der Sonne tritt eine Windstille ein. Nun erkalten Land und Meer durch die Wärmestrahlung gegen den Himmelsraum, das Land erkaltet aber rascher als das Meer, und nun entsteht der L a n d w i n d, indem die Luft in den unteren Regionen vom Lande nach dem Meere strömt, während in den oberen Luftregionen eine entgegengesetzte Strömung stattfindet.

Zu den Ursachen, welche Luftströmungen, ja die heftigsten Stürme erzeugen können, ist auch eine schnelle Kondensation des atmosphärischen Wasserdampfes zu zählen. Wenn man bedenkt, welch eine ungeheure Wassermasse während eines Platzregens in wenigen Minuten zur Erde fällt, welch ungeheures Volumen dieses Wasser eingenommen haben muß, als es noch in Dampfgestalt

in der Atmosphäre schwebte, so ist klar, daß durch die rasche Kondensation dieser Wasserdämpfe eine bedeutende Luftverdünnung bewirkt wird und daß die Luft von allen Seiten her mit Gewalt in den verdünnten Raum eindringen muß, um so mehr, als da, wo die Kondensation der Wasserdämpfe stattfindet, die Temperatur der Luft durch die freiwerdende Wärme erhöht und dadurch ein kräftig aufsteigender Luftstrom erzeugt wird.

Oft sieht man die Wolken in anderer Richtung ziehen, als die ist, welche die Windfahnen zeigen, und oft ziehen die höheren Wolken in anderer Richtung als die tiefer schwebenden, woraus hervorgeht, daß in verschiedenen Höhen Luftströmungen nach verschiedener Richtung stattfinden.

312 **Passatwinde und Moussons.** Als Columbus auf seiner Entdeckungsreise nach Amerika seine Schiffe durch einen beständigen Ostwind fortgetrieben sah, wurden seine Gefährten mit Schrecken erfüllt, weil sie fürchteten, nie mehr nach Europa zurückkehren zu können. Dieser in den Tropen beständig von Osten nach Westen wehende Wind, welcher so sehr das Erstaunen der Seefahrer des 15. Jahrhunderts erregte, ist der Passatwind. Die Schiffer benutzen diesen Wind, um von Europa nach Amerika zu segeln, indem sie von Madeira aus südlich bis in die Nähe des Wendekreises steuern, wo sie dann durch den Passat nach Westen getrieben werden. Diese Reise ist so sicher und die Arbeit der Matrosen dabei so gering, daß die spanischen Seeleute diesen Teil des atlantischen Oceans den Frauengolf (el golfo de las Damas) nannten. Auch in der Südsee weht dieser Wind; die spanischen Schiffer ließen sich durch ihn in gerader Linie von Acapulco nach Manilla treiben.

Im atlantischen Ocean erstreckt sich der Passatwind bis zum 29., im großen Ocean nur bis zum 25. Grade nördlicher Breite. In der nördlichen Hälfte der heißen Zone ist die Richtung des Passatwindes eine nordöstliche; je mehr er sich aber dem Äquator nähert, desto mehr wird seine Richtung rein östlich. Die Grenze des Passats ist in der südlichen Halbkugel weniger genau bestimmt, dort aber hat der Passat eine südöstliche Richtung, die mehr und mehr östlich wird, je weiter er gegen den Äquator vordringt.

Diese Winde wehen rund um die ganze Erde, doch sind sie in der Regel erst 50 Meilen weit vom festen Lande entschieden merklich.

Da, wo der Nordostpassat der nördlichen und der Südostpassat der südlichen Hemisphäre zusammentreffen, kombinieren sie sich zu einem rein östlichen Winde, der aber unmerklich wird, weil die horizontale Bewegung der durch die Intensität der Sonnenstrahlen stark erwärmten und deshalb mächtig aufsteigenden Luft eben durch diese vertikale Bewegung neutralisiert wird. Es würde in diesen Gegenden eine fast vollkommene Windstille herrschen, wenn nicht die heftigen Stürme, welche die fast täglich unter Blitz und Donner stattfindenden Regengüsse begleiten, die Ruhe der Atmosphäre störten und das Wehen sanfter regelmäßiger Winde unmöglich machten.

Diese Zone, welche die Passatwinde der beiden Hemisphären trennt, ist die Region der Kalmen.

Das Kärtchen Fig. 584 dient dazu, die Gegenden zu zeigen, in welchen die Passatwinde herrschen. Die Mitte der Region der Kalmen, welche im Durchschnitt eine Breite von 6° hat, fällt nicht, wie man wohl erwarten sollte, mit dem Äquator zusammen, sondern sie liegt nördlich von demselben. Während

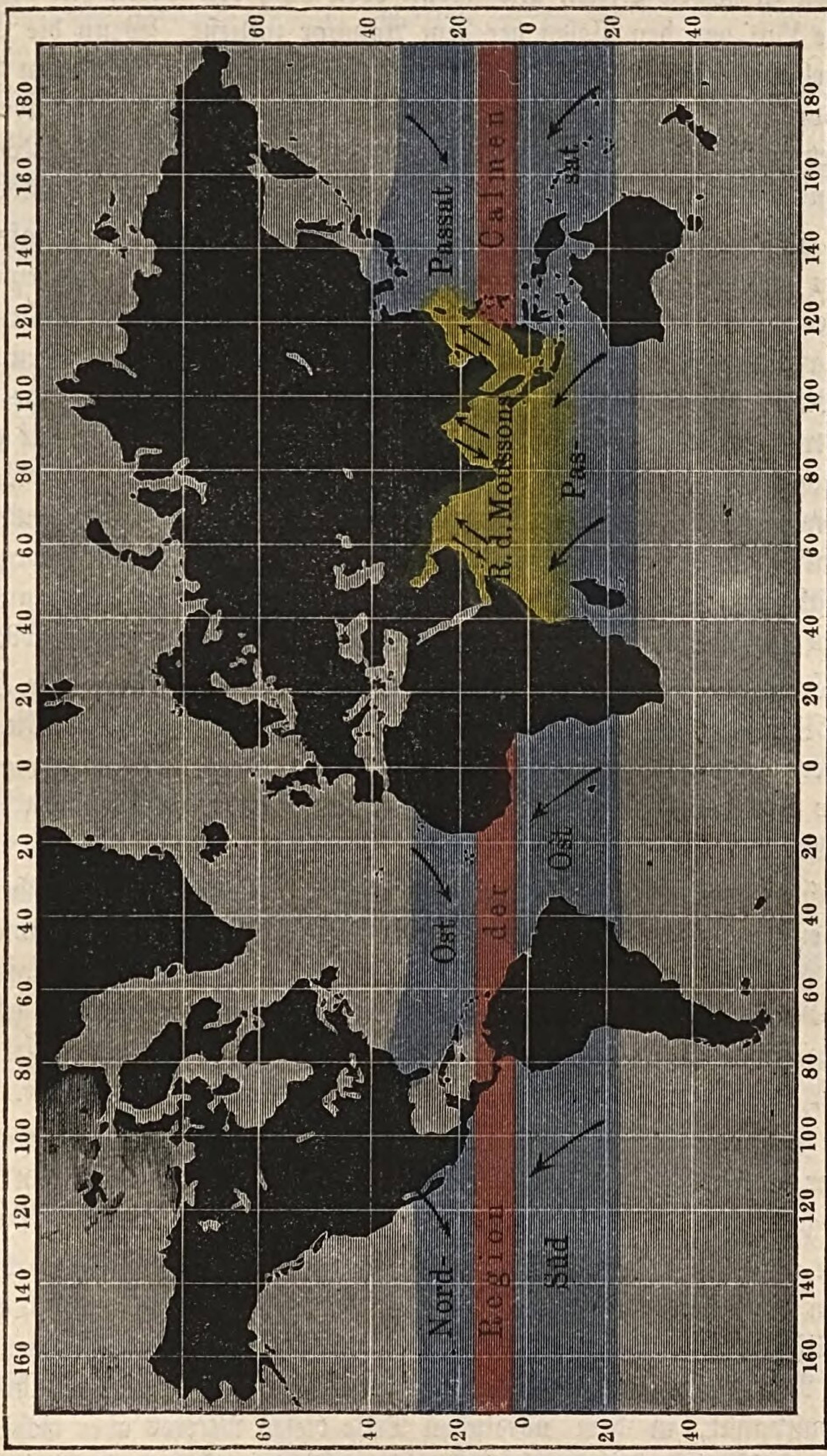


Fig. 584.

unserer Sommermonate ist der Gürtel der Kalmen breiter, und seine nördliche Grenze entfernt sich mehr vom Äquator, während die südliche Grenze sich nur wenig ändert.

Die Ursache davon, daß die Region der Kalmen auf der nördlichen Hemisphäre liegt, ist wohl in der Konfiguration der Kontinente zu suchen.

Die Passatwinde lassen sich leicht erklären. Die Luft, welche in den Äquatorialgegenden stark erwärmt in die Höhe steigt, erhebt sich über die kälteren Luftmassen zu beiden Seiten und strömt oben nach den Polen hin ab, während unten die Luft von den Polen her dem Äquator zufließt. Wenn die Erde keine Achsendrehung hätte, so würde der Passatwind auf der nördlichen Halbkugel gerade von Norden nach Süden, auf der südlichen Hemisphäre aber in entgegengesetzter Richtung wehen. Nun aber dreht sich die Erde von Westen nach Osten, und das Luftmeer, welches sie umgiebt, hat die gleiche Rotationsbewegung.

Je näher ein Ort der Erdoberfläche den Polen liegt, desto langsamer wird er sich in dem während 24 Stunden zu beschreibenden Kreise fortbewegen, weil dieser Kreis um so kleiner ist, je weiter man sich vom Äquator entfernt. Demnach ist auch die Rotationsgeschwindigkeit der über der Erde ruhenden Luftmasse in der Nähe der Pole geringer als am Äquator; wenn nun eine Luftmasse aus höheren Breiten dem Äquator zugeführt wird, so langt sie mit geringerer Rotationsgeschwindigkeit über Ländern an, welche sich schneller von Westen nach Osten bewegen; in Beziehung auf diesen unter ihr sich fortbewegenden Boden hat sie also eine Bewegung von Osten nach Westen. Diese Bewegung kombiniert sich mit der gegen den Äquator hin fortschreitenden Bewegung auf der nördlichen Halbkugel zu einem Nordost-, auf der südlichen zu einem Südostwinde.

Die in den Äquatorialgegenden aufsteigende Luft fließt in der Höhe nach beiden Seiten hin ab, um sich nach den Polen hin zu ergießen. Die Richtung dieses oberen Passats ist natürlich der des unteren gerade entgegengesetzt; sie ist in der nördlichen Halbkugel eine südwestliche, in der südlichen Halbkugel eine nordwestliche.

Daß in den oberen Luftregionen wirklich ein Passat weht, welcher dem unteren entgegengesetzt ist, läßt sich durch Thatsachen beweisen; so wurde z. B. am 25. Februar 1835 bei einem Ausbruche des Vulkans von Cosiguina im Staate Guatemala die Asche bis in die Höhe des oberen Passats geschleudert, der sie in südwestlicher Richtung fortführte, so daß sie auf der Insel Jamaika niederfiel, obgleich in den unteren Regionen der Nordpassat herrschte.

In größerer Entfernung vom Äquator senkt sich der obere Passat mehr und mehr gegen die Erdoberfläche. Auf dem Gipfel des Piks von Teneriffa herrschen fast immer Westwinde, während am Meeresspiegel der untere Passat weht.

Im indischen Ocean ist die Regelmäßigkeit der Passatwinde durch die Konfiguration der Ländermassen, welche dieses Meer umgeben, namentlich aber durch den asiatischen Kontinent, gestört. Im südlichen Teile des indischen Oceans, zwischen Neuholland und Madagaskar, herrscht noch das ganze Jahr hindurch der Südostpassat, in dem nördlichen Teile dieses Meeres aber weht während der einen Hälfte des Jahres ein beständiger Südwest-, während der anderen Hälfte des Jahres ein beständiger Nordostwind. Diese regelmäßig abwechselnden Winde werden Moussons genannt.

Der Südwestwind weht vom April bis zum Oktober, während der übrigen Monate des Jahres weht der Nordostwind.

Während in den Wintermonaten der asiatische Kontinent erkaltet, die Sonne aber in den südlicheren Gegenden eine größere Wärme erzeugt, muß natürlich ein Nordostpassat von dem kälteren Asien nach den heißeren Gegenden wehen. In dieser Zeit ist auch im indischen Ocean der Nordostpassat von dem Südostpassat durch die Region der Kalmen getrennt.

Während des Sommers wird das Wehen des Südostpassates zwischen Neuholland und Madagaskar nicht gestört, in den nördlichen Teilen des indischen Oceans aber, in welchen im Winter ein Nordostwind geherrscht hatte, wird dieser in einen Südwestwind verwandelt, weil sich nun der asiatische Kontinent sehr stark erwärmt und also eine Luftströmung nach Norden hin veranlaßt, welche durch die Rotation der Erde in einen Südwestwind verwandelt wird.

Winde in höheren Breiten. Der obere Passat, welcher die Luft 313
von den Äquatorialgegenden zurückführt, senkt sich, wie schon erwähnt wurde, immer mehr und erreicht endlich als Südwestwind den Boden; außerhalb der Region der Passatwinde gehen daher die beiden Luftströmungen, welche die Luft von den Polen zum Äquator und vom Äquator zurück nach den Polen führen, nicht mehr übereinander, sondern nebeneinander her und suchen einander gegenseitig zu verdrängen; bald erlangt der Südwest, bald der Nordost die Oberhand, und bei dem Übergange aus einer dieser Windrichtungen in eine andere sehen wir die Zwischenwinde nach allen Richtungen der Windrose wehen.

Obgleich auch in höheren Breiten Südwest und Nordost die herrschenden Winde sind, so findet zwischen ihnen doch keine so regelmäßige periodische Abwechselung statt wie bei den Moussons im indischen Oceane.

Die folgende Tabelle giebt die Häufigkeit der Winde in verschiedenen Ländern an; sie giebt nämlich an, wie oft im Durchschnitt unter je 1000 Tagen ein jeder der acht Hauptwinde weht.

Länder	N.	N.O.	O.	S.O.	S.	S.W.	W.	N.W.
England	82	111	99	81	111	225	171	120
Frankreich	126	140	84	76	117	192	155	110
Deutschland . . .	84	98	119	87	97	185	198	131
Dänemark . . .	65	98	100	129	92	198	161	156
Schweden	102	104	80	110	128	210	159	106
Rußland	99	191	81	130	98	143	166	192
Nordamerika . .	96	116	49	108	123	197	101	210

Man sieht aus dieser Tabelle, daß im westlichen Europa die Südwestwinde entschieden vorherrschen; besonders ist dies in England der Fall. In Rußland dagegen sind die Nordost- und Nordwestwinde überwiegend.

Dem im westlichen Europa vorherrschenden Südwestwinde, welcher über die warmen Gewässer des atlantischen Oceans gestrichen ist und sich dabei mit Wasserdämpfen beladen hat, verdankt dieses Land sein Küstenklima. Auch tritt in Europa der Charakter des Seeklimas, nämlich milde Winter und kühle Sommer mit häufigem Regen, in solchen Jahren entschiedener auf, in welchen der Südwestwind häufiger weht; in solchen Jahren hingegen, in welchen die nordöstliche Windströmung länger herrscht als gewöhnlich, findet eine Annäherung an das Kontinentalklima statt.

314 **Gesetz der Winddrehung.** Obgleich bei einer oberflächlichen Betrachtung in unseren Gegenden die Änderungen in der Windrichtung ganz regellos zu sein scheinen, so haben doch aufmerksamere Beobachter schon lange die Bemerkung gemacht, daß die Winde in der Regel in folgender Ordnung auf einander folgen:

$$S, SW, W, NW, N, NO, O, SO, S.$$

Am regelmäßigsten läßt sich diese Drehung des Windes während des Winters beobachten; die mit diesem Umschlagen zusammenhängenden Veränderungen des Barometers und des Thermometers hat Dove sehr schön mit folgenden Worten geschildert:

„Wenn der Südwest, immer heftiger wehend, endlich vollkommen durchgedrungen ist, erhöht er die Temperatur über den Gefrierpunkt, es kann daher nicht mehr schneien, sondern es regnet, während das Barometer seinen niedrigsten Stand erreicht. Nun dreht sich der Wind nach West, und der dichte Flockenschnee beweist ebenso gut den einfallenden kälteren Wind als das rasch steigende Barometer, die Windfahne und das Thermometer. Mit Nord heitert der Himmel sich auf, mit Nordost tritt das Maximum der Kälte und des Barometers ein. Aber allmählich beginnt dieses zu fallen, und feine Cirri (Federwolken) zeigen durch die Richtung ihres Entstehens den oben eingetretenen südlicheren Wind, den das Barometer schon bemerkt, wenn auch die Windfahne nichts davon weiß und noch ruhig Ost zeigt. Doch immer bestimmter verdrängt der südliche Wind den Ost von oben herab, bei entschiedenem Fallen des Quecksilbers wird die Windfahne *SO*, der Himmel bezieht sich allmählich immer mehr, und mit steigender Wärme verwandelt sich der bei *SO* und *S* fallende Schnee bei *SW* wieder in Regen. Nun geht es von neuem an, und höchst charakteristisch ist der Niederschlag auf der Ostseite von dem auf der Westseite gewöhnlich durch eine kurze Aufhellung getrennt.“

Nicht immer läßt sich die Drehung des Windes so rein beobachten wie es eben angeführt wurde, indem häufig ein Zurückspringen des Windes stattfindet; ein solches Zurückspringen wird aber weit häufiger auf der Westseite der Windrose beobachtet als auf der Ostseite. Eine vollständige Umdrehung des Windes in entgegengesetzter Richtung, nämlich von *S* nach *O*, *N*, *W*, wird in Europa höchst selten beobachtet.

Die Erklärung dieses Gesetzes ergiebt sich durch die Verallgemeinerung der Erklärung der Passatwinde.

Wird die Luft durch irgend eine Ursache von den Polen nach dem Äquator getrieben, so kommt sie von Orten, deren Rotationsgeschwindigkeit geringer ist, an andere Orte, welche eine größere Rotationsgeschwindigkeit besitzen; ihre Bewegung erhält dadurch eine östliche Richtung, wie wir schon beim Passatwinde gesehen haben. Auf der nördlichen Halbkugel gehen deshalb die Winde, welche als Nordwinde entstehen, bei ihrem allmählichen Fortrücken durch *NO* in *O* über. Ist auf diese Weise ein Ostwind entstanden, so wird dieser, wenn die Ursache fortdauert, welche die Luft nach dem Äquator hintreibt, hemmend auf den Polarstrom wirken, die Luft wird die Rotationsgeschwindigkeit des Ortes annehmen, über welchem sie sich befindet, und wenn nun die Tendenz nach dem Äquator zu strömen, immer noch fortdauert, so springt der Wind nach Norden zurück und dieselbe Reihe von Erscheinungen wiederholt sich.

Wenn aber, nachdem die Polarströme eine Zeit lang geherrscht haben und die Windrichtung östlich geworden ist, Äquatorialstürme eintreten, so wird der Ostwind durch Südost nach Süd umschlagen. Wenn die Luft von Süden nach Norden fortströmt, so gelangt sie mit der größten Rotationsgeschwindigkeit derjenigen Parallelkreise, welche dem Äquator näher liegen, an Orte, welche eine geringe Rotationsgeschwindigkeit haben; sie wird also der von Westen nach Osten rotierenden Erdoberfläche mit noch größerer Rotationsgeschwindigkeit gleichsam voraneilen, die südliche Windrichtung wird allmählich südwestlich und dann ganz westlich werden müssen. Bei fortdauernder Tendenz der Luft, nach dem Pole zu strömen, wird der Wind alsbald wieder nach Süd zurückspringen, gerade so, wie der Ost nach Norden zurückspringt; wenn aber die Äquatorialströmung durch eine Polarströmung verdrängt wird, so schlägt der Westwind durch Nordwest nach Norden um.

Auf der südlichen Halbkugel muß der Wind in entgegengesetzter Richtung umschlagen.

Wo in den Tropen die Passatwinde wehen, giebt es an der Erdoberfläche selbst gar keine vollständige Drehung, die Richtung des Passats wird nur bei seinem Vordringen immer mehr östlich.

In der Region der Moussons findet im Laufe eines ganzen Jahres nur eine einzige Drehung statt. Man sieht also, daß die Windverhältnisse der Tropen der einfachste Fall des Drehungsgesetzes sind.

Stürme. Die Stürme sind Folgen einer bedeutenden Abnahme des Luftdruckes, und höchst wahrscheinlich rührt diese Abnahme von einer raschen Kondensation der Wasserdämpfe her, wie dies schon oben angedeutet wurde. 315

Die Untersuchungen von Dove haben gezeigt, daß die Stürme meistens als große fortschreitende Wirbel zu betrachten sind, in deren Centrum sich das barometrische Minimum befindet. In der nördlich gemäßigten Zone bewegt sich das barometrische Minimum in der Richtung von Südwest gegen Nordost, während die Luft, von oben betrachtet, sich im umgekehrten Sinne des Uhrzeigers um das Minimum dreht.

Während des Sturmes vom 24. auf den 25. December 1821 schritt das

barometrische Minimum von Brest bis zum Kap Lindenäs, also in der Richtung des Pfeils *A C*, Fig. 585 vor. Nach Dove's Theorie mußte, wie

Fig. 585.



es in der That auch war, London Südostwind haben, als die Luft um den Punkt *A* wirbelte, dagegen mußte in London der Nordwest wehen, nachdem *B* und später *C* der Mittelpunkt der Wirbelbewegung geworden war.

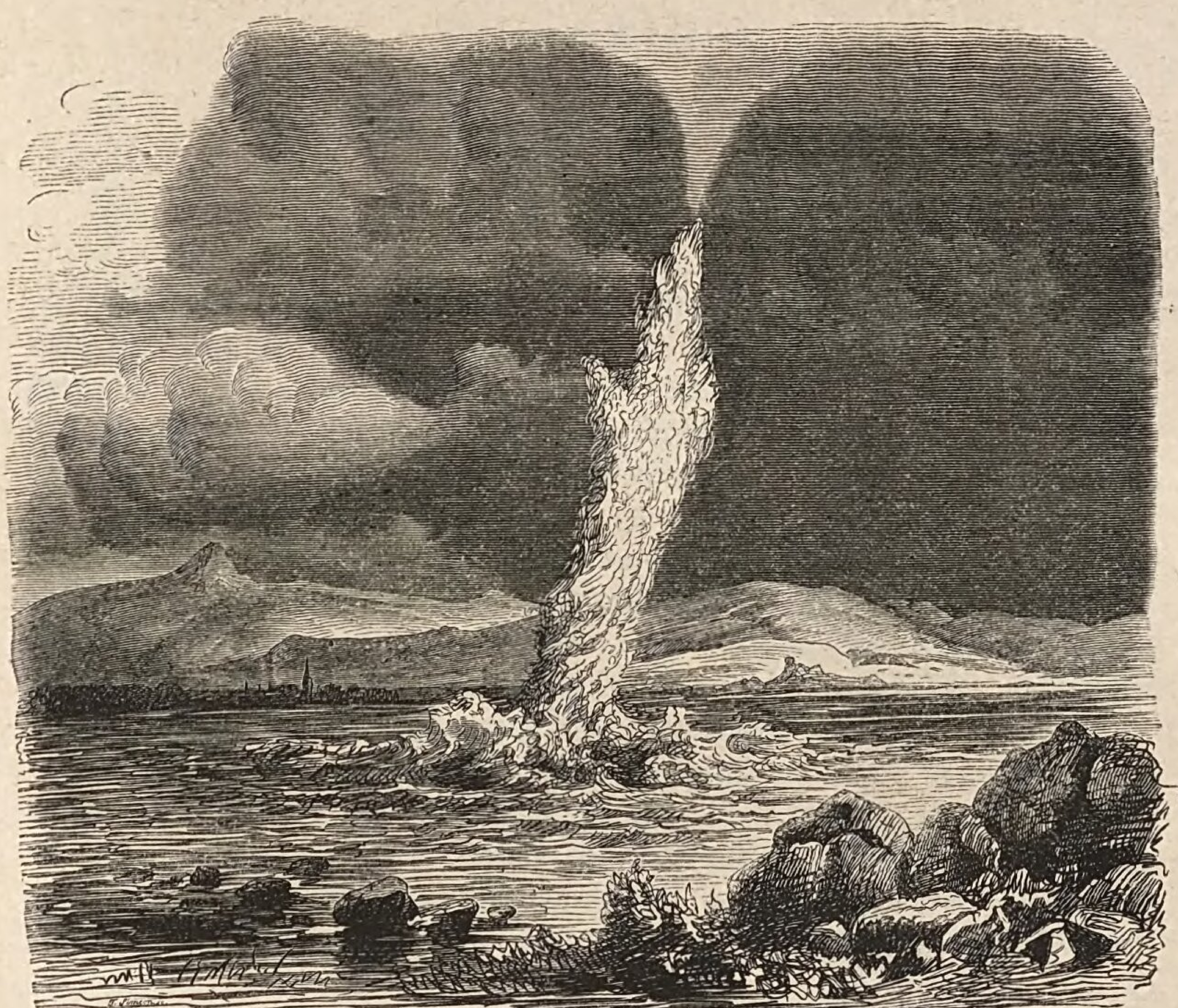
Südöstlich von dem Wege, auf welchem der Mittelpunkt des Wirbels fortschreitet, setzt der Wind, wie man aus der Betrachtung des Punktes *o* ersieht, zu Anfang des Sturmes mit *S* ein und schlägt dann durch *SW* nach *W* um; auf der Nordwestseite der Bahn des Minimums setzt der Wind mit *O* ein und schlägt durch *NO* nach *N* um.

Für die Seefahrer ergeben sich daraus folgende praktische Regeln, um in der nördlichen gemäßigten Zone so viel als möglich dem Bereich eines sie treffenden Wirbelwindes zu entgehen. Wenn bei stark fallendem Barometerstand der Wind als Südwind einsetzt und sich durch Südwest nach West dreht, so muß das Schiff nach Südwest steuern; setzt hingegen der Wind in östlicher

Richtung ein und schlägt durch Nordost nach Nord um, so muß das Schiff nach Nordost steuern.

In den Tropen wüten die Stürme ungleich heftiger als in höheren Breiten; die Zerstörungen der Orkane, welche man in Amerika mit dem Namen der Tornados bezeichnet, sind wahrhaft fürchterlich. So wurden z. B. durch den Sturm, welcher am 26. Juli 1825 Guadeloupe verwüstete, solid gebaute Häuser umgerissen; Kanonen wurden bis zur Brüstung der Batterie, auf welcher sie standen, fortgeschleudert, ein Brett von ungefähr 3 Fuß Länge, 8 Zoll Breite und 10 Linien Dicke wurde mit solcher Geschwindigkeit durch die Luft

Fig. 586.



gejagt, daß es den Stamm eines Palmbaumes, welcher ungefähr 17 Zoll im Durchmesser hatte, durch und durch bohrte.

Oft sieht man bei ruhigem Wetter, wie Sand und Staub durch den Wind in wirbelnder Bewegung fortgeführt werden. Bei herannahenden Gewittern sieht man schon größere Luftwirbel der Art, welche Staub, Blätter, Stroh u. s. w. mit in die Höhe nehmen. Die Tromben sind nichts anderes als solche Wirbel in größerem Maßstabe; sie werden in der Regel durch den Kampf zweier in den oberen Luftregionen in entgegengesetzter Richtung wehender Winde er=

zeugt. Sie bilden gewöhnlich einen Doppelkegel; der obere Teil desselben, dessen Spitze herabgesenkt ist, besteht aus einer Wolkenmasse, während der untere Kegel, dessen Spitze nach oben gerichtet ist, aus Wasser besteht, wenn das Meteor auf dem Meere oder über Seeen und Flüssen sich bildet, oder aus Sand und sonstigen festen Körpern, wenn die Trombe über das Land herzieht. Tromben sind im Stande, Bäume zu entwurzeln, Häuser abzudecken, Balken mehrere hundert Schritte weit fortzuschleudern u. s. w. Die Wassertromben sind unter dem Namen der Wasserhosen bekannt. Fig. 586 (a. v. S.) stellt eine im Jahre 1858 in der Nähe von Königswinter beobachtete Wasserhose dar.

Drittes Kapitel.

Von der atmosphärischen Feuchtigkeit.

Verbreitung des Wasserdampfes in der Luft. Wenn 316
man an einem heißen Sommertage eine mit Wasser gefüllte Schale ins Freie stellt, so sieht man die Quantität des Wassers rasch abnehmen: es verdunstet, d. h. es geht in Dampfgestalt über und verbreitet sich in der Luft. Der Wasserdampf ist wie jedes andere farblose durchsichtige Gas für unsere Blicke unsichtbar, das Wasser scheint, indem es verdunstet, gänzlich zu verschwinden.

Der in der Luft verbreitete Wasserdampf, welchen man als atmosphärische Feuchtigkeit bezeichnet, wird erst wieder sichtbar, wenn er in seinen flüssigen Zustand zurückkehrt und Nebel oder Wolken, Tau oder Reif bildet. Wenn man sich von der Existenz des Wasserdampfes in der Luft überzeugen will, muß man ihn auf irgend eine Weise verdichten.

Man unterscheidet eine absolute und eine relative Feuchtigkeit. Unter jener versteht man das Gewicht des Wasserdampfes in 1 cbm Luft, unter dieser dagegen das Verhältnis der absoluten Feuchtigkeit zu derjenigen, welche vorhanden wäre, wenn sich der Dampf im Zustande der Sättigung befände. Die hundertfache relative Feuchtigkeit wird auch Feuchtigkeitsgrad genannt.

Enthält z. B. 1 cbm Luft 12,5 g Wasserdampf, so ist die absolute Feuchtigkeit 12,5. Beträgt ferner die Lufttemperatur 20° C., so könnten, wie nachstehende Tabelle zeigt, in 1 cbm Luft 17,03 g Wasserdampf enthalten sein; die relative Feuchtigkeit ist somit 12,5 : 17,03 = 0,73 und der Feuchtigkeitsgrad gleich 73. Die relative Feuchtigkeit ist also außer von der absoluten Feuchtigkeit auch noch von der Lufttemperatur abhängig, weil mit dieser das Maximum des Dampfgehaltes zunimmt.

In der folgenden Tabelle sind der besonderen Wichtigkeit wegen die den verschiedenen Lufttemperaturen t entsprechenden, in einem Kubikmeter enthaltenen größtmöglichen Mengen s des gesättigten Wasserdampfes in Grammen angegeben.

t	s	t	s	t	s	t	s
0	4,70	10	9,22	20	17,03	30	30,06
1	5,05	11	9,82	21	18,06	31	31,73
2	5,42	12	10,46	22	19,14	32	33,49
3	5,81	13	11,13	23	20,28	33	35,34
4	6,22	14	11,84	24	21,48	34	37,28
5	6,66	15	12,60	25	22,75	35	39,31
6	7,12	16	13,39	26	24,07	36	41,43
7	7,60	17	14,23	27	25,46	37	43,64
8	8,11	18	15,11	28	26,91	38	45,95
9	8,65	19	16,05	29	28,44	39	48,37
10	9,22	20	17,03	30	30,06	40	50,90

Die Ermittelung der atmosphärischen Feuchtigkeit bildet einen besonderen Teil der Meteorologie und heißt Hygrometrie; die dazu dienenden Apparate heißen Hygrometer, wenn aus ihren Angaben die Feuchtigkeit berechnet werden kann, dagegen Hygroskope, wenn sie den Feuchtigkeitsgrad der Luft nur mehr oder weniger annähernd erkennen lassen.

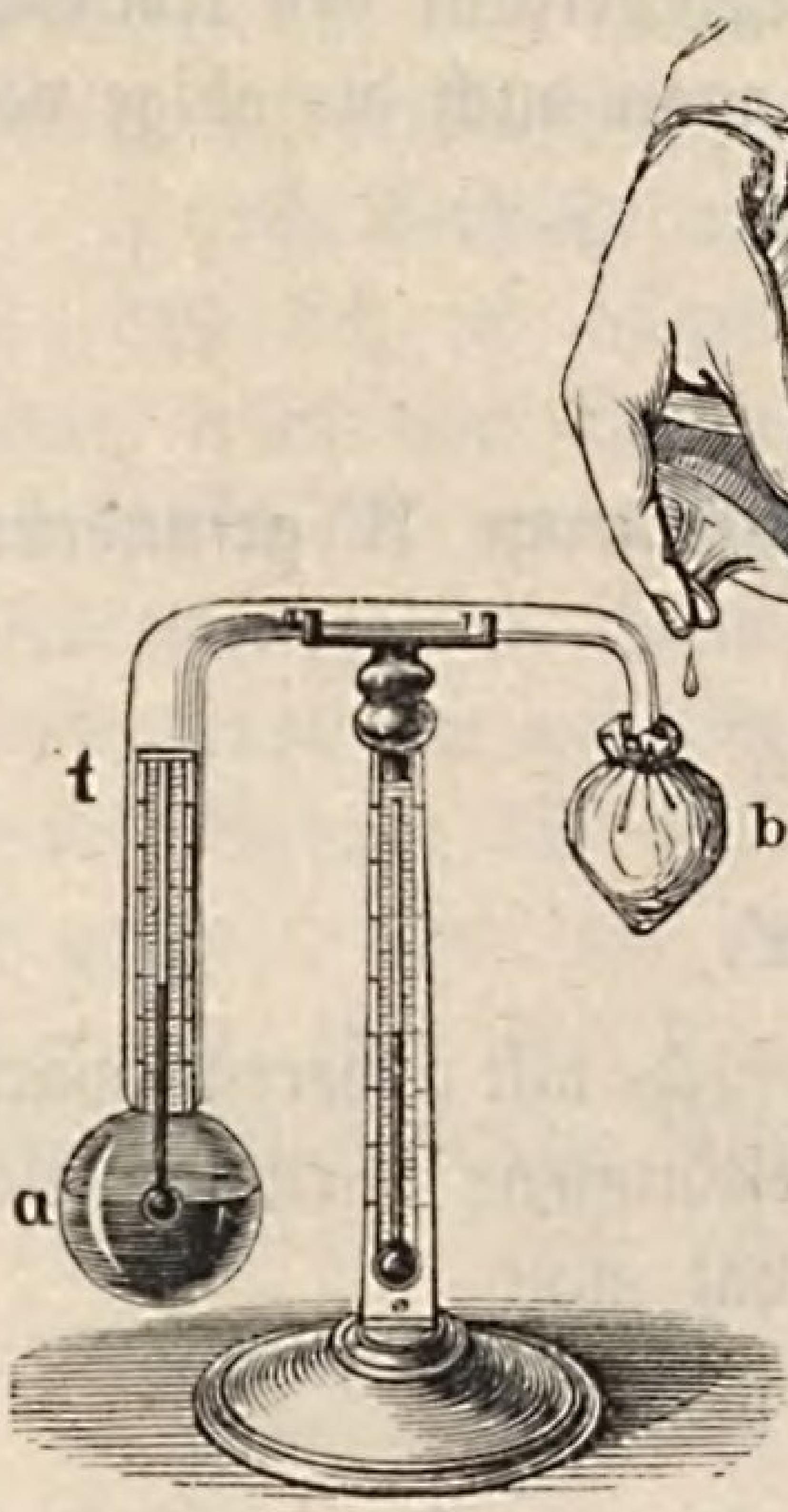
317 **Hygrometer und Hygroskope.** Zur Bestimmung der Feuchtigkeit werden drei Verfahren angewandt, nämlich das direkte, das Daniell'sche und das August'sche.

Das direkte Verfahren besteht darin, daß man eine bestimmte Luftmenge, z. B. 20 l durch eine abgewogene, mit trockenem Chlorkalcium gefüllte Glasröhre, in welcher sämtliches Wasser zurückgehalten wird, hindurchleitet und die Gewichtszunahme der Röhre durch Abwägung nach dem Versuche bestimmt. Diese Gewichtszunahme ist das Gewicht des in der durchgeleiteten Luft enthaltenen Wasserdampfes. Hätte z. B. das Gewicht der Röhre während des Hindurchleitens von 20 l Luft um 0,268 zugenommen, so wären in 20 l Luft 0,268 g und somit in 1000 l oder in 1 cbm 50 . 0,268 = 13,4 g Wasserdampf enthalten.

Das Daniell'sche Verfahren beruht auf der Bestimmung des Taupunktes, d. i. derjenigen Temperatur, bei welcher der in der Luft vorhandene Wasserdampf gesättigt ist und sich zu verdichten beginnt. Das hierzu dienende Hygrometer Fig. 587 besteht aus einer doppelt gebogenen, auf einem Stativ befestigten, luftleeren Glasröhre, welche in zwei Kugeln endigt, von denen die eine *a* zur Hälfte mit Schwefeläther gefüllt ist und ein kleines Thermometer enthält, während die andere eine Hülle von Kattun trägt. Beim Versuche wird auf die Kattunhülle Äther getröpfelt, welcher rasch verdunstet und deshalb eine bedeutende Abkühlung der Kugel *b* bewirkt, so daß die darin enthaltenen Dämpfe

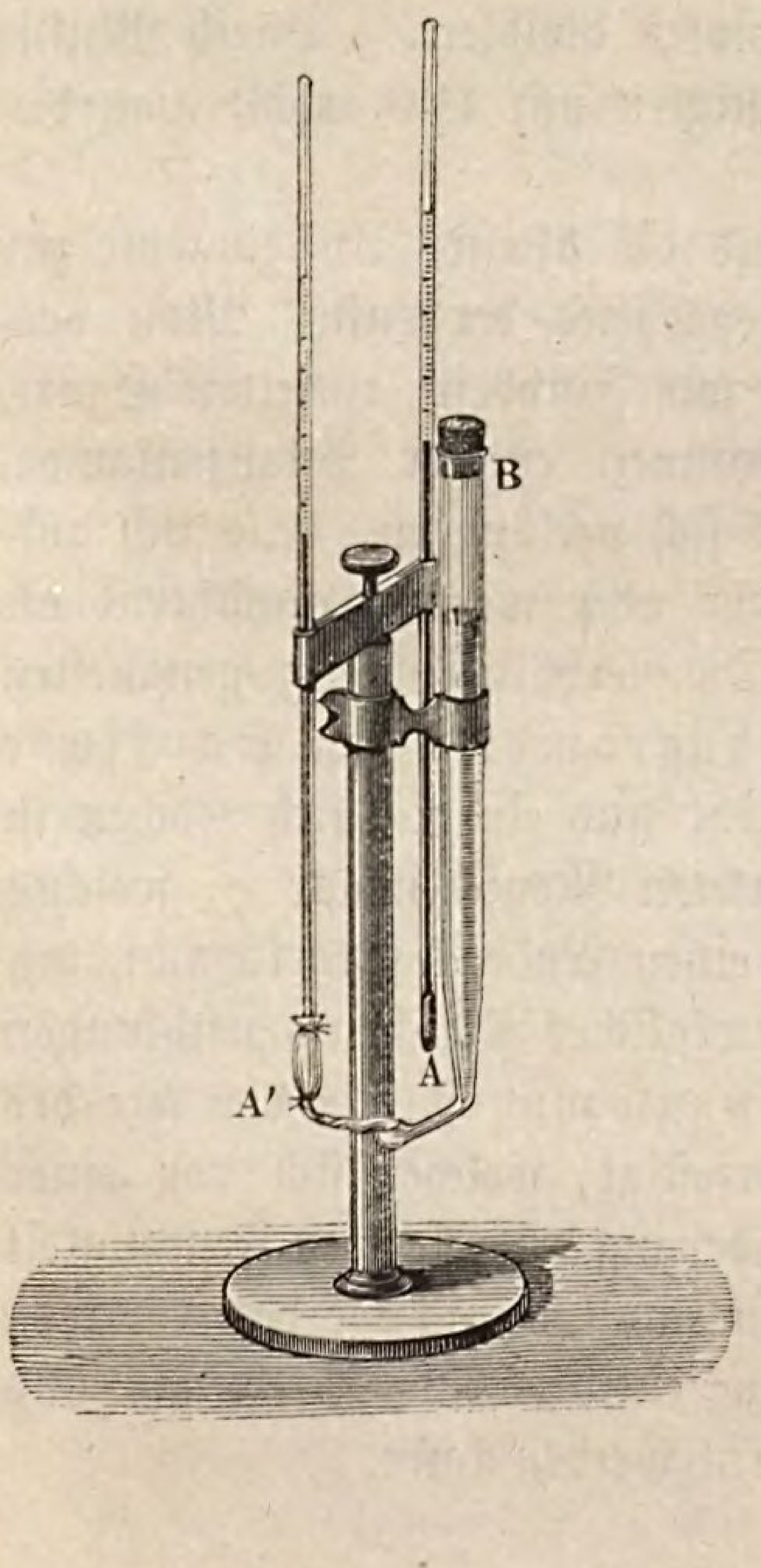
teilweise verdichtet werden und eine geringere Spannkraft annehmen. Infolge dessen verdampft nun auch Äther in der Kugel a, wodurch diese gleichfalls abgekühlt wird und sich mit einem feinen Tau beschlägt, wenn sie bis zum Taupunkt erkaltet ist. Der Taupunkt wird dann am inneren Thermometer abgelesen. Nun kennt man die Temperatur, bei welcher der in der Luft enthaltene Wasserdampf gesättigt ist; man kann daher mit Hülfe der obigen Tabelle die in einem Kubikmeter enthaltene Dampfmenge oder die absolute Feuchtigkeit bestimmen. Hätte man z. B. die Temperatur des Taupunktes gleich 10° C. gefunden, so wäre die absolute Feuchtigkeit gleich 9,22.

Fig. 587.



Das *August'sche Verfahren* beruht auf der Bestimmung der Verdunstungskälte des Wassers. Das hierzu dienende Hygrometer wird *Psychrometer* genannt und besteht, wie Fig. 588 zeigt, aus zwei an einem und demselben Gestelle befestigten Thermometern; die Kugel des einen ist mit einem feinen Leinwandläppchen umgeben, während die Kugel des anderen frei bleibt.

Fig. 588.



Wenn man die Hülle der einen Thermometerkugel mit Wasser befeuchtet, so verdunstet es in der Art, daß sich die Hülle mit einer Schicht gesättigten Dampfes von der Temperatur des feuchten Thermometers umgiebt, welcher nach der Luft der Umgebung diffundiert. Diese Diffusion und somit auch die Verdunstung erfolgt um so rascher, je größer der Unterschied der absoluten Feuchtigkeiten der gesättigten Dampfschicht und der umgebenden Luft ist und je kleiner der Luftdruck ist (siehe §. 268). Bezeichnet man daher mit f die absolute Feuchtigkeit der Luft, mit f' die der gesättigten Dampfschicht und mit b den Barometerstand, so kann man die in einer gewissen Zeit verdunstende Wassermenge

$$W = (f' - f)\,\alpha : b$$

setzen, wenn α eine konstante Größe bedeutet.

Die Verdunstung des Wassers ist aber auch von einer Wärmebindung begleitet, infolge deren das umwickelte Thermometer sinkt. Wenn die Luft vollkommen mit Feuchtigkeit gesättigt

ist, so wird kein Wasser verdampfen können, die beiden Thermometer stehen alsdann gleich hoch; ist aber die Luft nicht mit Wasserdampf gesättigt, so wird das umwickelte Thermometer sinken, und zwar um so tiefer, je rascher die Verdunstung vor sich geht. Bezeichnet man daher die Temperatur des trockenen Thermometers mit t, die des feuchten mit t', so kann man auch die obige verdunstende Wassermenge

$$W = (t - t')\,\alpha'$$

setzen, wenn α' wieder eine konstante Größe bedeutet.

Setzt man die beiden für die verdunstende Wassermenge W gefundenen Werte einander gleich, so erhält man

$$(f' - f)\,\alpha : b = (t - t')\,\alpha'$$

und hieraus

$$f = f' - (t - t') \,.\, b \,.\, \alpha : \alpha'.$$

Der Wert von $\alpha : \alpha'$ ist durch vergleichende Versuche mit anderen Hygrometern und für jeden Beobachtungsort besonders zu bestimmen; durchschnittlich kann derselbe gleich 0,001 gesetzt werden. Demnach hat man

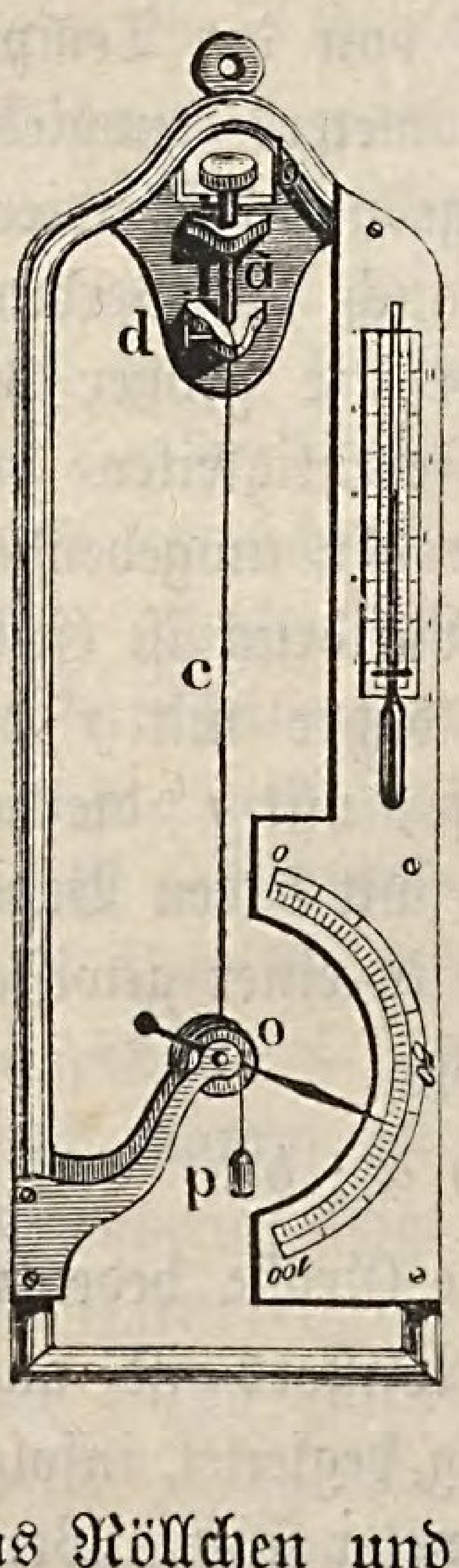
$$f = f' - 0{,}001\,(t - t') \,.\, b.$$

Beträgt z. B. $t = 20^0$ C., $t' = 17^0$ und $b = 750$ mm, so ist $f' = 14{,}23$ und daher

$$f = 14{,}23 - 0{,}75 \,.\, 3 = 11{,}98.$$

Ist die absolute Feuchtigkeit bestimmt, so ergiebt sich die relative, wenn man die absolute Feuchtigkeit durch die Dichte des bei der vorhandenen Lufttemperatur gesättigten Dampfes dividiert. Durch Multiplikation der relativen Feuchtigkeit mit 100 erhält man den Feuchtigkeitsgrad.

Fig. 589.



Die Hygroskope sind die ältesten Instrumente zur Erkennung des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft. Man verwendet zu denselben Stoffe, wie Fischbein, entfettete Haare, Darmsaiten, sowie die Grannen einiger Pflanzensamen, welche in feuchter Luft teils sich verlängern, teils sich aufdrehen; dieselben zeigen mehr oder weniger annähernd die relative Feuchtigkeit an. Die verhältnismäßig genauesten Ablesungen giebt das Haarhygrometer von Saussure (Fig. 589). Dasselbe besteht aus einem durch Kochen in schwacher Sodalösung entfetteten Menschenhaar c, welches auf einem Stative mit dem einen Ende d festgeklemmt, mit dem anderen über ein leicht bewegliches Röllchen o geschlungen und durch ein Gewichtchen p gespannt ist; an der Axe des Röllchens ist ein Zeiger befestigt, welcher sich vor einer Skala befindet. Mit Veränderung der relativen Feuchtigkeit ändert sich im gleichen Sinne auch die Länge des Haares; das Röllchen und der Zeiger erhalten daher eine entsprechende Drehung, aus welcher annähernd die relative Feuchtigkeit erkannt werden kann.

Tägliche und jährliche Variationen im Wassergehalte der Luft. Da bei hoher Temperatur mehr Wasserdampf in der Luft verbreitet werden kann und daher mit steigender Wärme das Wasser an der Oberfläche der Gewässer und vom feuchten Boden mehr und mehr verdunstet, so läßt sich wohl erwarten, daß der Wassergehalt der Luft im Laufe eines Tages ab- und zunehmen wird. 318

Durch Versuche mit den oben beschriebenen Instrumenten hat man ermittelt, daß sich im allgemeinen die Menge des Wasserdampfes in der Luft vermehrt, wenn von Sonnenaufgang an die Temperatur steigt; jedoch dauert dies nur bis 9 Uhr, wo ein durch die starke Erwärmung des Bodens veranlaßter aufwärtssteigender Luftstrom die Dämpfe mit in die Höhe nimmt, so daß der Wassergehalt der unteren Luftschichten geringer wird, obgleich bei immer zunehmender Wärme die Bildung der Dämpfe fortdauert. Die Abnahme dauert bis gegen 4 Uhr; von da an nimmt der Wassergehalt der unteren Luftschichten wieder zu, weil nun die nach oben gerichtete Luftströmung aufhört den sich bildenden Wasserdampf wegzuführen; jedoch dauert diese Zunahme nur bis gegen 9 Uhr abends, weil nun die immer mehr sinkende Temperatur der Luft der ferneren Dampfbildung eine Grenze setzt.

Im Winter, wo die Wirkung der Sonne weniger intensiv ist, verhält sich die Sache anders; im Januar beobachtet man nur *ein* Maximum des Wassergehaltes der Luft um 2 Uhr nachmittags und *ein* Minimum zur Zeit des Sonnenaufganges.

Wir sagen: „*die Luft ist trocken*,“ wenn das Wasser rasch verdunstet und nasse Gegenstände durch dieses rasche Verdunsten schnell trocken werden; dagegen sagen wir: „*die Luft ist feucht*,“ wenn solche Gegenstände an der Luft nur langsam oder gar nicht trocknen, oder wenn die geringste Temperaturerniedrigung feuchte Niederschläge bewirkt und etwas kältere Gegenstände sich mit Tau überziehen. Wir nennen also die Luft *trocken*, wenn ihre Temperatur weit vom Sättigungspunkte entfernt ist, *feucht* dagegen, wenn die Temperatur der Luft dem Taupunkt sehr nahe liegt; mit diesem Urteile über die Trockenheit oder Feuchtigkeit der Luft verbinden wir also durchaus kein Urteil über deren absoluten Wassergehalt. Wenn an einem heißen Sommertage bei einer Temperatur von 25° C. jedes Kubikmeter Luft 12 g Wasserdampf enthält, so sagen wir, die Luft sei sehr trocken; denn bei dieser Temperatur könnte jedes Kubikmeter Luft 22,75 g Wasserdampf enthalten, oder die Luft müßte noch unter 15° erkaltet werden, um bei unverändertem Wassergehalte gesättigt zu sein. Wenn dagegen im Winter bei einer Temperatur von + 4° jedes Kubikmeter Luft nur 6 g Wasserdampf enthält, so ist die Luft sehr feucht, weil die Luft für die herrschende Temperatur beinahe vollständig mit Wasserdampf gesättigt ist und die geringste Temperaturerniedrigung schon einen Niederschlag zur Folge hat.

In diesem Sinne können wir sagen, daß zur Zeit des Sonnenaufgangs die Luft am feuchtesten ist, obgleich der absolute Wassergehalt geringer ist als zu jeder anderen Tageszeit.

Der absolute Wassergehalt der Luft ist wie die mittlere Lufttemperatur im

Januar ein Minimum; er nimmt bis zum Juli zu, wo er sein Maximum erreicht, dann aber nimmt er wieder ab bis zum Ende des Jahres.

Obgleich nun der Wassergehalt der Luft im Sommer größer ist als im Winter, so sagt man doch, die Luft sei im Sommer trockener, weil sie im Sommer durchschnittlich weiter von ihrem Sättigungspunkte entfernt ist. Die größte Trockenheit in dieser Jahreszeit besitzt die Luft gegen 3 Uhr nachmittags.

319 **Feuchtigkeit der Luft in verschiedenen Gegenden.** Die Bildung des Wasserdampfes ist vorzugsweise von zwei Bedingungen abhängig, nämlich von der Temperatur und von dem Vorhandensein von Wasser. Bei einem unbegrenzten Wasservorrate werden sich um so mehr Wasserdämpfe bilden, je höher die Temperatur ist; bei gleicher Temperatur aber werden sich in wasserreichen Gegenden mehr Dämpfe bilden können als in wasserarmen. Daraus folgt nun, daß der absolute Wassergehalt der Luft unter sonst gleichen Umständen von dem Äquator nach den Polen hin abnehmen muß, und daß sie im Innern der großen Kontinente trockener, d. h. weiter von ihrem Sättigungspunkte entfernt ist, als auf dem Meere und an den Meeresküsten. Wie sehr die Trockenheit der Luft mit der Entfernung vom Meere zunimmt, beweist schon die Heiterkeit des Himmels der Binnenländer.

320 **Der Tau.** Wenn im Sommer nach Sonnenuntergang der Himmel heiter und die Luft ruhig bleibt, so erkalten die verschiedenen Gegenstände auf der Erdoberfläche durch die nächtliche Strahlung gegen den Himmelsraum mehr und mehr, ihre Temperatur sinkt um 2, 3, ja manchmal um 7 bis 8° unter die Temperatur der Luft herab. Die kalten Körper erniedrigen auch die Temperatur der sie zunächst umgebenden Luftschichten, und wenn diese bis zum Taupunkte erkaltet sind, so setzt sich ein Teil des in ihnen enthaltenen Wasserdampfes in Form von feinen Tröpfchen an die kalten Körper an.

Da nicht alle Körper gleiches Wärmestrahlungsvermögen haben, so erkalten auch einige stärker als andere, und so kommt es, daß manche Körper stark mit Tau überzogen sind, während andere fast ganz trocken bleiben. Gras und Blätter erkalten besonders stark durch die nächtliche Strahlung, teils weil sie ein sehr starkes Strahlungsvermögen besitzen, teils aber auch, weil sie frei in die Luft hineinragen, so daß ihnen vom Boden aus nur wenig Wärme zugeleitet werden kann; man findet sie deshalb stärker betaut als Steine und den nackten Boden.

Eine Wolkendecke, welche den Himmel überzieht, hindert die Taubildung, weil sie die nächtliche Strahlung hindert. Auch wenn ein nur etwas lebhafter Wind weht, taut es nicht, weil er beständig von neuem warme Luft mit den festen Körpern in Berührung bringt, wodurch diesen fortwährend Wärme zugeführt wird und die Luft an ihnen vorbeistreicht, ehe sie bis zum Taupunkte erkaltet werden kann.

Der Reif ist nichts anderes als gefrorener Tau. Wenn der Körper, an welchem sich der kondensierte Wasserdampf absetzt, unter 0° erkaltet ist, so kann er sich nicht mehr in flüssiger Gestalt, sondern nur in Form von Eisnadeln absetzen.

Nebel und Wolken. Wenn Wasserdämpfe aus einem Topfe mit 321
kochendem Wasser aufsteigen und sich in der kälteren Luft verbreiten, so werden sie alsbald verdichtet: es entsteht der Schwaden, welcher aus einer Menge kleiner Wassertröpfchen besteht, die in der Luft schweben. Man nennt diesen Schwaden auch öfters Dampf, doch ist es kein eigentlicher Dampf mehr, wenigstens kein Dampf im physikalischen Sinne des Wortes, sondern verdichtetes Wassergas.

Wenn die Verdichtung der Wasserdämpfe nicht durch Berührung mit kalten festen Körpern, sondern durch die ganze Masse der Luft hindurch vor sich geht, so entstehen Nebel, welche im großen dasselbe sind wie der Schwaden, den wir über kochendem Wasser sehen.

Nebel entsteht jederzeit, wenn die mit Wasserdämpfen gesättigte Luft auf irgend eine Weise durch ihre ganze Masse hindurch unter ihren Taupunkt erkaltet wird, wenn also die mit Wasserdampf gesättigte wärmere Luft durch Windströmungen an kältere Orte hingeführt, oder wenn sie mit kälteren Luftmassen gemengt wird.

Die Wolken sind nichts anderes als Nebel, welche in den höheren Luftregionen schweben, gleichwie Nebel nichts anderes als Wolken sind, welche auf dem Boden aufliegen. Oft sieht man die Gipfel der Berge in Wolken eingehüllt, während die Wanderer auf diesen Bergspitzen sich mitten im Nebel befinden.

Auf den ersten Anblick scheint es unbegreiflich, wie die Wolken in der Luft schweben können, da sie doch aus Tröpfchen bestehen, welche offenbar schwerer sind als die umgebende Luft. Da jedoch ihr Gewicht im Vergleich zu ihrer Oberfläche sehr gering ist, so muß die Luft ihrem Falle einen bedeutenden Widerstand entgegensetzen, und die Tröpfchen können jedenfalls nur sehr langsam herabsinken. Somit müssen aber doch die Tröpfchen, wenn auch noch so langsam, herabfallen, und man sollte demnach meinen, daß bei ruhigem Wetter sich die Wolken endlich bis auf den Boden herabsenken müßten.

Die bei ruhigem Wetter allerdings herabsinkenden Wassertröpfchen können aber den Boden nicht erreichen, weil sie bald in wärmere, nicht mit Dämpfen gesättigte Luftschichten gelangen, in welchen sie sich wieder in Dampf auflösen und dem Blicke entschwinden; während sich aber unten die Tröpfchen auflösen, werden an der oberen Grenze neue gebildet, und so scheint die Wolke unbeweglich in der Luft zu schweben.

Wir haben eben die Wolken in ganz ruhiger Luft betrachtet. In bewegter Luft werden sie der Richtung der Luftströmung folgen müssen; ein Wind, welcher sich in horizontaler Richtung fortbewegt, wird die Wolken auch in horizontaler Richtung fortführen und ein aufsteigender Luftstrom wird sie mit in die Höhe nehmen, sobald seine Geschwindigkeit größer ist als die Geschwindigkeit, mit welcher die Wassertröpfchen in ruhiger Luft herabfallen würden. So erklärt sich denn auch durch die aufsteigenden Luftströme das Steigen des Nebels.

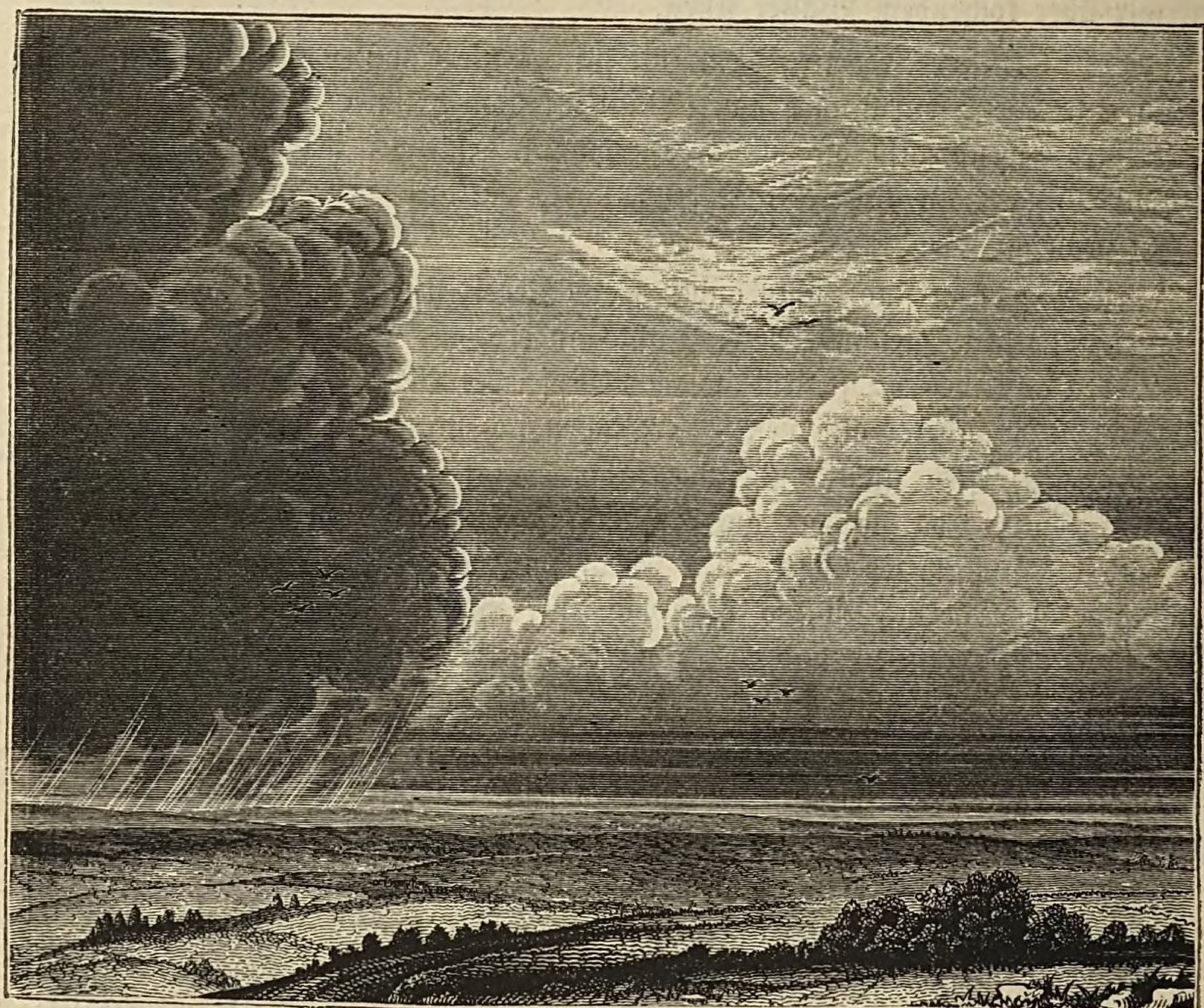
Die Wolken gewähren, je nachdem sie höher oder tiefer schweben, oder je nachdem sie mehr oder weniger dicht, auf diese oder jene Weise beleuchtet

sind u. s. w., einen gar mannigfaltigen Anblick. Howard hat unter den verschiedenen Wolken folgende Hauptarten unterschieden:

1) Die Federwolke, cirrus, besteht aus sehr zarten, bald mehr streifigen, bald mehr locken- oder federförmigen Fasern, welche nach schönem Wetter zuerst am Himmel erscheinen. In Fig. 590 sieht man sie in dem Eck oben rechts bis herunter, wo die zwei Vögel schweben. Bei trockenem Wetter sind die Federwolken mehr streifig, bei feuchtem mehr ineinander verlaufend.

2) Die Haufenwolke, cumulus, welche in unserer Figur gerade unter der Federwolke gezeichnet ist, bildet große halbkugelförmige Massen, welche auf

Fig. 590.



horizontaler Basis zu ruhen scheinen. Diese Wolken erscheinen vorzugsweise im Sommer; manchmal türmen sich Haufenwolken zu malerischen Gruppen zusammen und bieten dann von der Sonne beschienen, den Anblick ferner Schneegebirge.

3) Die Schichtwolken, stratus, sind horizontale Wolkenstreifen (in unserer Figur unter den cumulus), welche vorzugsweise bei Sonnenuntergang mit außerordentlicher Farbenpracht erscheinen.

Diese Grundformen gehen auf mannigfaltige Weise in einander über; Howard hat diese Übergangsformen durch die Namen cirro-cumulus, cirro-stratus und cumulo-stratus bezeichnet.

Die fedrige Haufenwolke, cirro-cumulus, ist der Übergang der Federwolke zur Haufenwolke; es sind die kleinen, weißen, runden Wölkchen, welche unter dem Namen Schäfchen allgemein bekannt sind.

Wenn die Federwolken nicht einzeln zerstreut, sondern zu Streifen von bedeutender Ausdehnung verbunden sind, so bilden sie die federigen Schichtwolken, cirro-stratus, welche, wenn sie nahe am Horizonte stehen, den Anblick ausgedehnter Schichten bieten; oft überziehen die cirro-stratus den ganzen Himmel mit einem Schleier.

Wenn die Haufenwolken dichter werden, so gehen sie in die streifigen Haufenwolken, cumulo-stratus, über, welche oft den ganzen Horizont mit einem blauschwarzen Farbentone überziehen, und endlich in die eigentliche Regenwolke, nimbus (in unserer Figur links), übergehen.

Wenn man bedenkt, wie außerordentlich mannigfaltig an Gestalt sowohl als auch an Farbe die verschiedenen Wolken sein können, so begreift man wohl, daß es oft schwierig ist, zu unterscheiden, ob das Ansehen einer Wolke sich mehr dem einen oder dem andern Typus nähert.

Unter allen Wolkenarten sind die Federwolken die höchsten, denn auf hohen Bergen bieten sie noch denselben Anblick wie im Thale. Kämtz hat zu Halle ihre Höhe annähernd zu 6000 m bestimmt. Es ist höchst wahrscheinlich, daß die cirrus nicht aus Nebelbläschen, sondern aus Eisnädelchen bestehen.

Die Haufenwolken bilden sich gewöhnlich, wenn durch den aufsteigenden Luftstrom die Wasserdämpfe in die Höhe geführt und dort, wegen der geringeren Temperatur, verdichtet werden. Daher kommt es, daß sich oft gegen Mittag Wolken bilden, während die Sonne am heitern Himmel aufgegangen ist, und gegen Abend der Himmel wieder heiter wird, weil die Wolken sich wieder senken, wenn der aufsteigende Strom aufhört; in tieferen, wärmeren Regionen angekommen, lösen sich dann die Wolken wieder auf, wenn die Luft nicht mit Dämpfen gesättigt ist. Wenn aber der Südwestwind mehr und mehr Wasserdämpfe herbeigeführt hat, so daß die Luft mit Dämpfen gesättigt ist, so können die sich senkenden Wolken nicht wieder aufgelöst werden, sie werden dichter und dunkler, während oft hoch über den unteren Wolken eine Schicht von Federwolken schwebt. Die unteren Haufenwolken gehen dann mehr und mehr in cumulo-stratus über, und man hat alsdann Regen zu erwarten.

Wenn durch fortwährende Kondensation von Wasserdämpfen die einzelnen Wassertröpfchen größer und schwerer werden und sich nähern und zusammenfließen, so bilden sich förmliche Wassertropfen, welche dann als Regen herabfallen. In der Höhe sind die Regentropfen noch sehr klein, sie werden aber während des Fallens größer, weil sie wegen ihrer geringen Temperatur die Wasserdämpfe der Luftschichten verdichten, durch welche sie herabfallen.

Regenmenge. Die Menge des Regens, welcher an irgend einem Orte 322
der Erde im Laufe eines Jahres fällt, ist für die Meteorologie ein höchst wichtiges Element. Die Instrumente, deren man sich zur Bestimmung dieser Menge bedient, werden Regenmesser, Ombrometer oder Udometer genannt. Die

Fig. 591 stellt eine zweckmäßige Form des Regenmessers dar. Der Regen fällt in ein Blechgefäß *A*, dessen obere freie Öffnung einen Flächeninhalt von 500 qcm hat. Das in 24 Stunden angesammelte Wasser wird in den Meßcylinder (Fig. 592) abgelassen und gemessen. Ausgedrückt wird die Regenmenge durch die Höhe in Centimetern, welche das Wasser auf der Erd-

Fig. 591.

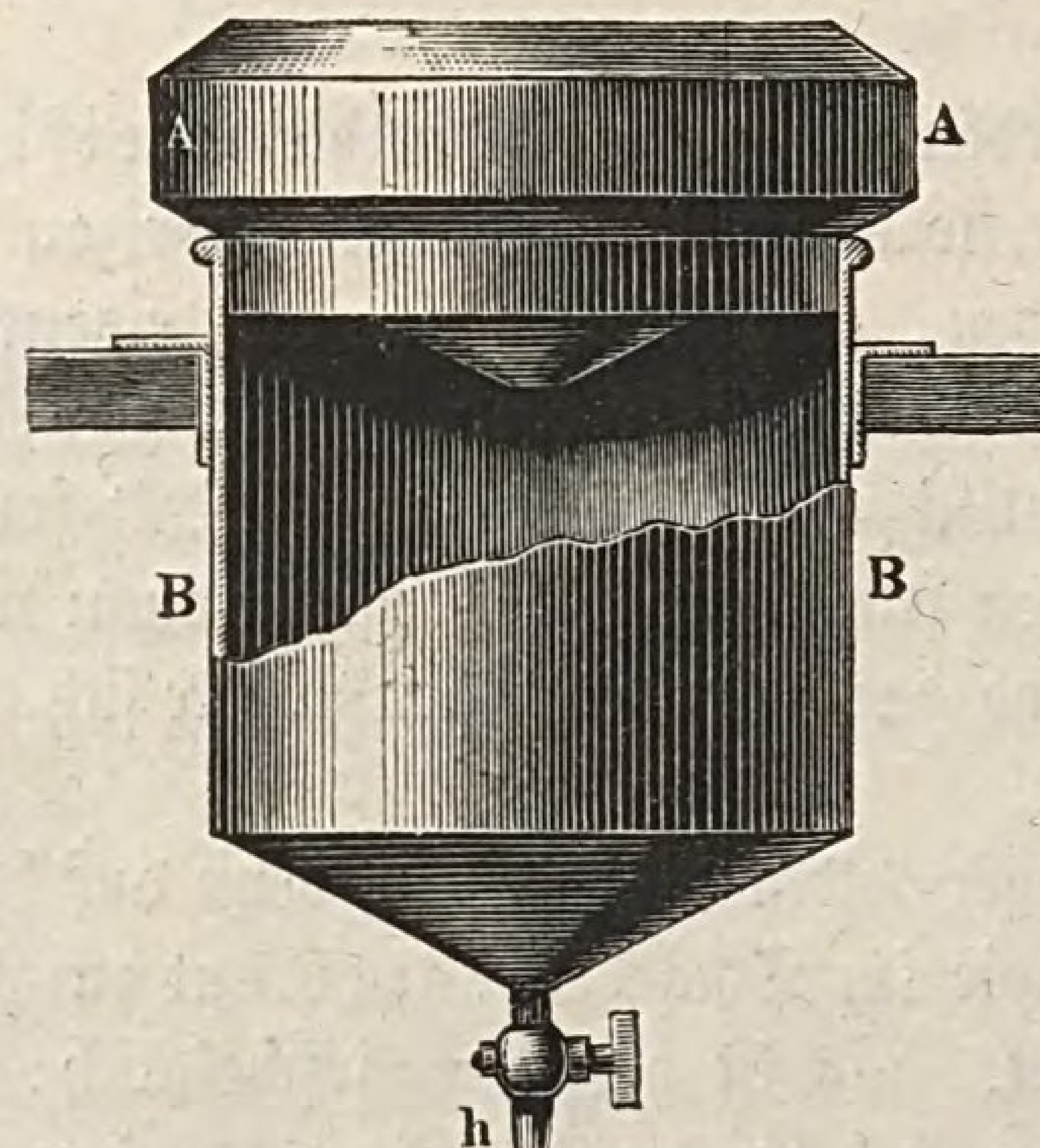
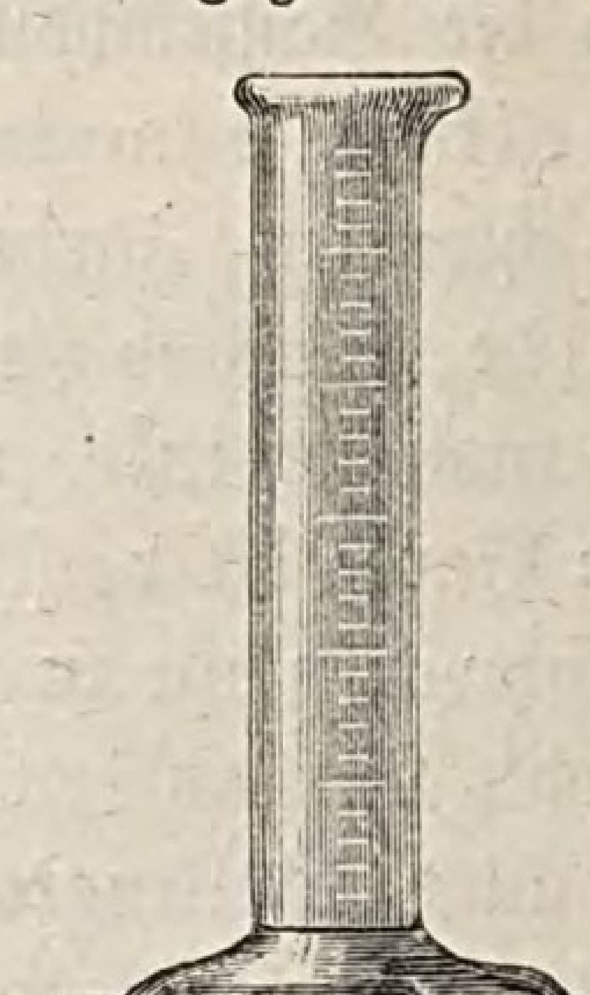


Fig. 592.



oberfläche erreichen würde, wenn es weder in den Boden eindringen, noch abfließen, noch verdunsten würde. In diesem Sinne beträgt die jährliche Regenmenge in

Lissabon	67 cm	Frankfurt a. M.	70 cm	Zürich	87 cm	Bergen	224 cm
Marseille	56 „	Göttingen	67 „	Verona	93 „	Stockholm	51 „
Paris	57 „	Regensburg	57 „	Genua	120 „	Kopenhagen	47 „
Dover	119 „	Erfurt	34 „	Rom	79 „	Upsala	45 „
London	63 „	Innsbruck	80 „	Palermo	56 „	Petersburg	46 „

Die Regenmenge ist jedoch nicht gleichförmig über das ganze Jahr verteilt; in dieser Beziehung läßt sich Europa in drei Provinzen teilen.

In England, auf den Westküsten von Frankreich, in den Niederlanden und Norwegen sind die Herbstregen vorherrschend.

In Deutschland, den westrheinischen Gegenden, Dänemark und Schweden herrschen die Sommerregen vor.

Im südöstlichen Frankreich, Italien, dem südlichen Portugal, überhaupt dem Teile Europas, welcher Afrika zunächst liegt, fehlen die Sommerregen fast ganz.

Die Anzahl der **Regentage** während eines Jahres nimmt in Europa im allgemeinen von Süden nach Norden zu. Im Durchschnitte kommen auf das Jahr

im südlichen Europa	. . . . .	120 Regentage
„ mittleren „	. . . . .	146 „
„ nördlichen „	. . . . .	180 „

Daß die Regenmenge nicht allein von der Zahl der Regentage abhängen kann, ist klar; denn es kommt ja nicht allein darauf an, an wie vielen Tagen es regnet, sondern auch wie viel es regnet. Wenn in nördlichen Gegenden die Zahl der Regentage zunimmt, so nimmt dagegen die Intensität des Regens im allgemeinen ab, und so erklärt es sich z. B., daß in Petersburg die Zahl der Regentage zwar größer, die Regenmenge aber geringer ist als in Rom.

Mit der Entfernung der Meere nimmt sowohl die Regenmenge als auch die Zahl der Regentage ab; so kommen z. B. im Durchschnitt

in Petersburg	168
„ Kasan	90
„ Jakutzk	60

Regentage auf das ganze Jahr.

So wie unter sonst gleichen Umständen der Regen in wärmeren Gegenden intensiver ist als in kälteren, so ist er auch in der warmen Jahreszeit intensiver als in der kalten. Im Durchschnitt kommen in Deutschland auf den Winter 38, auf den Sommer 42 Regentage; die Zahl der Regentage ist also im Sommer kaum etwas bedeutender als im Winter, und doch ist die Regenmenge im Sommer ungefähr doppelt so groß als im Winter. In den Sommermonaten fällt oft bei einem einzigen Gewitter mehr Regen als sonst in mehreren Wochen.

Regen zwischen den Wendekreisen. Da, wo die Passatwinde 323
mit großer Regelmäßigkeit wehen, ist der Himmel meistens heiter, und es regnet selten, namentlich wenn die Sonne auf der anderen Hemisphäre steht. Auf den Kontinenten aber wird die Regelmäßigkeit des Passats durch die Intensität des aufsteigenden Luftstromes gestört, sobald sich die Sonne dem Zenith nähert; um diese Zeit stellt sich auch ein mehrere Monate andauerndes heftiges Regenwetter ein, während die andere Hälfte des Jahres hindurch der Himmel heiter und die Luft trocken ist.

Humboldt hat uns die Erscheinungen der nassen Jahreszeit im nördlichen Teile von Südamerika beschrieben. Vom December bis zum Februar ist die Luft trocken und der Himmel heiter. Im März wird die Luft feuchter, der Himmel weniger rein, der Passatwind weht weniger stark, und oft ist die Luft ganz ruhig. Mit Ende März beginnen die Gewitter; sie bilden sich des Nachmittags, wenn die Hitze am größten ist, und sind von heftigen Regengüssen begleitet. Gegen Ende April fängt eigentlich die nasse Jahreszeit an; der Himmel überzieht sich mit einem gleichförmigen Grau, und es regnet täglich von 9 Uhr morgens bis 4 Uhr nachmittags; des Nachts ist der Himmel meistens rein. Der Regen wird am heftigsten, wenn die Sonne im Zenith steht. Allmählich wird die Zeit des Tages, in welcher es regnet, immer kürzer und gegen Ende der Regenzeit regnet es nur nachmittags.

Die Dauer der Regenzeit ist in verschiedenen Gegenden nicht dieselbe, sie beträgt 3 bis 5 Monate.

In Ostindien, wo die Regelmäßigkeit der Passatwinde durch örtliche Verhältnisse gestört ist und wo statt ihrer die Moussons wehen, finden wir auch

anormale Regenverhältnisse; an der steilen Westküste von Vorderindien fällt die Regenzeit mit der Zeit unseres Sommers zusammen, sie fällt nämlich in die Zeit, zu welcher die Südwestmoussons wehen und, mit Feuchtigkeit beladen, an die hohen Gebirge anstoßen. Während es auf der Küste Malabar regnet, ist auf der Ostküste Coromandel der Himmel heiter; hier stellt sich die Regenzeit mit dem Nordostpassat, also gerade zu der Zeit ein, zu welcher auf der Westküste die trockene Jahreszeit herrscht.

In der Region der Calmen findet man diese periodischen Regen nicht; es finden hier fast täglich heftige Regengüsse statt. Der aufsteigende Luftstrom führt eine Masse von Wasserdämpfen in die Höhe, welche sich in den kälteren Regionen wieder verdichten. Die Sonne geht fast immer bei heiterem Himmel auf, gegen Mittag bilden sich einzelne Wolken, welche dichter und dichter werden, bis ihnen endlich, meist unter heftigen Windstößen und elektrischen Entladungen eine ungeheuere Regenmenge entströmt. Gegen Abend zerstreut sich das Gewölk, und die Sonne geht wieder bei heiterm Himmel unter.

Die jährliche Regenmenge ist im allgemeinen in den Tropen sehr groß; sie beträgt z. B. in Bombay 199, in Kandy 186, in Sierra Leone 218, in Rio Janeiro 150, auf St. Domingo 272, in Havannah 233 und in Granada 287 cm. Bedenkt man nun, daß der Regen meist nur auf wenige Monate verteilt ist und daß es nur an wenigen Stunden des Tages regnet, so ist klar, daß der Regen sehr stark sein muß. In Bombay fiel an einem Tage 16 cm, zu Cayenne in 10 Stunden 27 cm Regen. Die Regentropfen sind sehr groß und fallen mit solcher Geschwindigkeit nieder, daß sie auf der nackten Haut ein schmerzhaftes Gefühl erzeugen.

324 **Schnee und Hagel.** Über die Bildung des Schneees weiß man bis jetzt noch sehr wenig. Wahrscheinlich bestehen die Wolken, in denen sich die Schneeflocken zuerst bilden, nicht aus Wassertröpfchen, sondern aus feinen Eiskryställchen, welche durch fortwährende Kondensation von Wasserdämpfen größer werden und so Schneeflocken bilden, die selbst noch beim Herabfallen durch die unteren Luftschichten wachsen. Sind die unteren Luftregionen zu warm, so schmelzen die Schneeflocken, ehe sie den Boden erreichen; es regnet dann unten, während es oben schneit.

Auf die regelmäßige Gestalt der Schneeflocken, welche man am besten beobachten kann, wenn man sie auf einem dunklen, unter 0^0 erkalteten Körper auffängt, hat schon Keppler aufmerksam gemacht, Fig. 593 und Fig. 594 zeigen einige Schneefiguren, welche im schneereichen Februar 1855 beobachtet wurden.

Schon eine oberflächliche Betrachtung dieser Figuren zeigt, daß sich alle diese Gestalten im wesentlichen auf einen regelmäßigen sechsseitigen Stern zurückführen lassen, wonach denn die Schneeflocken dem hexagonalen Krystallsysteme (dem Krystallsysteme des Bergkrystalls) angehören.

Der Graupelregen, den man gewöhnlich im März und im April

beobachtet, entsteht auf ähnliche Art wie der Schnee; die Graupelkörner bestehen aus ziemlich fest zusammengeballten Eisnädelchen.

Der Hagel ist eine der furchtbarsten Geißeln für den Landmann und eines der schwierigsten Probleme für den Meteorologen.

Fig. 593.

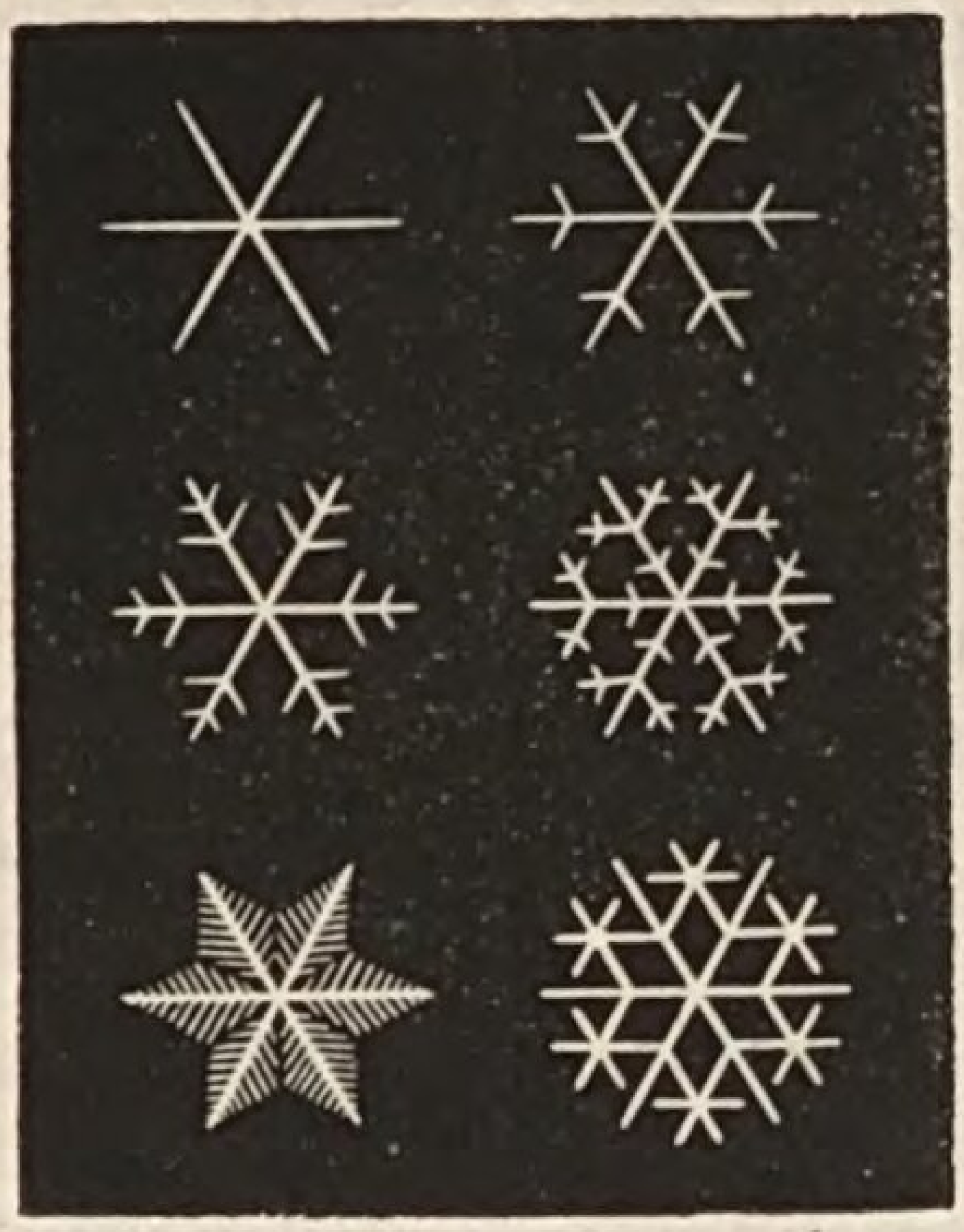
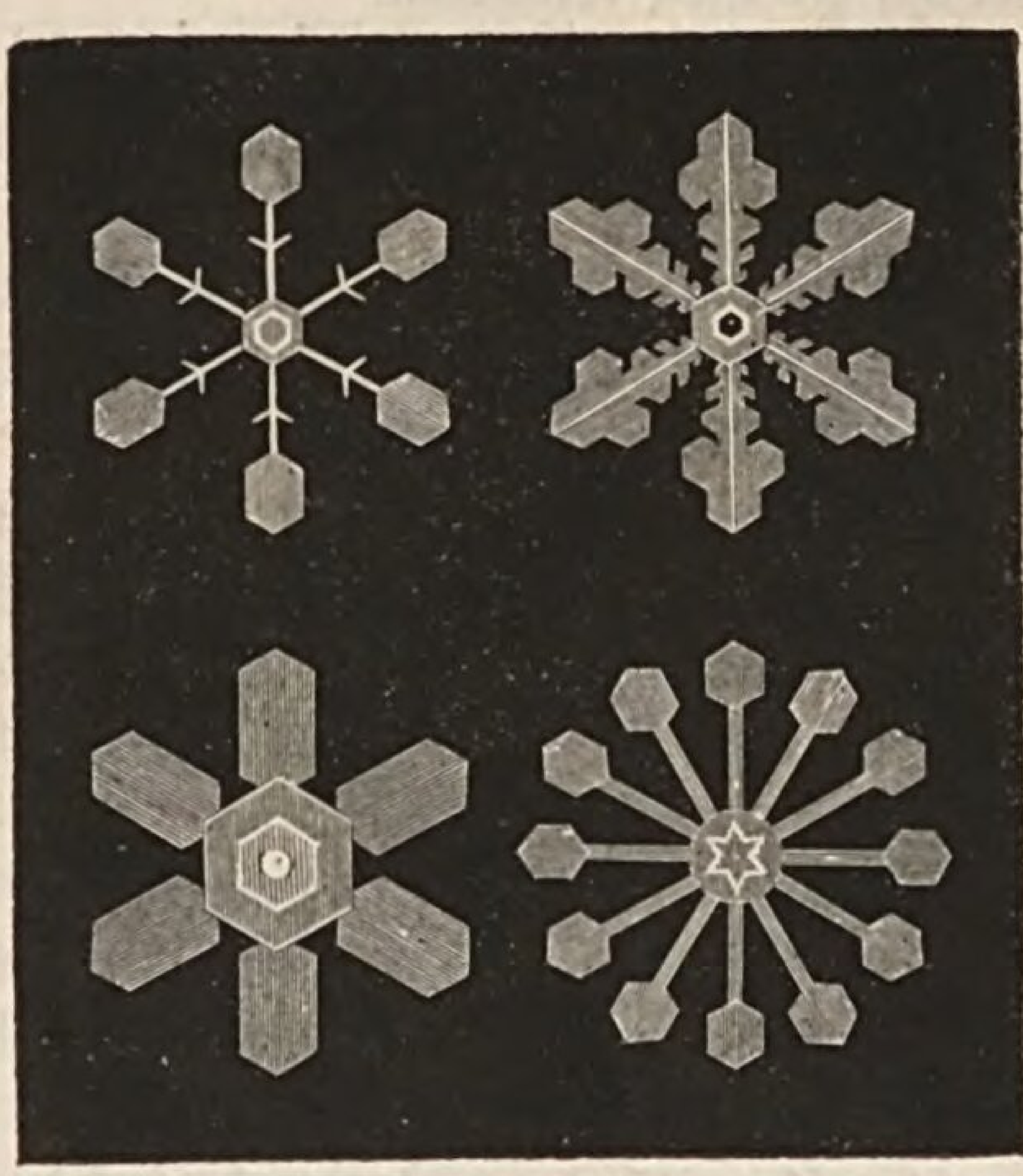


Fig. 594.



Die gewöhnliche Größe der Hagelkörner ist die einer Haselnuß; sehr häufig fallen kleinere, sie werden aber als weniger gefährlich nicht sonderlich beachtet, oft sind sie aber auch weit größer und zerschmettern dann Alles, was sie treffen.

Glaubwürdige Naturforscher haben Hagelkörner beobachtet, welche bis 400 g wogen.

Die Form der Hagelkörner ist sehr verschieden. In der Regel sind sie abgerundet, manchmal aber auch abgeplattet oder eckig. In der Mitte der Hagelkörner befindet sich in der Regel ein undurchsichtiger Kern, welcher den Graupelkörnern gleicht; dieser Kern ist mit einer durchsichtigen Eismasse umgeben, in welcher sich manchmal einzelne konzentrische Schichten unterscheiden lassen. Bisweilen beobachtet man abwechselnd durchsichtige und undurchsichtige Eisschichten; endlich hat man auch schon Hagelkörner von strahliger Struktur beobachtet.

Pouillet fand, daß die Temperatur der Hagelkörner von — 0,5 bis — 4° C. beträgt.

Der Hagel geht gewöhnlich den Gewitterregen voran, oder er begleitet sie. Nie, oder wenigstens fast nie, folgt der Hagel auf den Regen, namentlich wenn der Regen einige Zeit gedauert hat.

Das Hagelwetter dauert meistens nur einige Minuten, selten dauert es $^1/_4$ Stunde lang. Die Menge des Eises, welches in so kurzer Zeit aus den Wolken herabfällt, ist ungeheuer; die Erde ist manchmal zollhoch damit bedeckt.

Der Hagel fällt häufiger bei Tag als bei Nacht. Die Wolken, welche ihn bringen, scheinen eine bedeutende Ausdehnung und eine bedeutende Tiefe zu haben, denn sie verbreiten in der Regel eine große Dunkelheit. Man glaubt bemerkt zu haben, daß sie eine eigentümlich graurötliche Farbe besitzen, daß an ihrer unteren Grenze große Wolkenmassen herabhängen und daß ihre Ränder vielfach zerrissen erscheinen.

Die Hagelwolken scheinen meist sehr niedrig zu schweben. Die Bergbewohner sehen öfters unter sich Wolken, welche die Thäler mit Hagel überschütten.

Einige Augenblicke vor dem Beginne des Hagelwetters hört man ein eigentümliches, rasselndes Geräusch. Endlich ist der Hagel stets von elektrischen Erscheinungen begleitet.

Über die Erklärung des Hagels sind die Naturforscher noch keineswegs einig. Volta's Theorie, nach welcher die ursprünglich kleinen Hagelkörner zwischen entgegengesetzt elektrischen Wolken so lange hin und her gestoßen werden, bis sie endlich ihre Größe erlangt haben, ist ziemlich allgemein als unwahrscheinlich aufgegeben worden.

Viel wahrscheinlicher ist dagegen die fast gleichzeitig (1849) von Fr. Vogel und von Karl Nöllner aufgestellte Hageltheorie. Nach dieser Theorie können die Wassertröpfchen, welche die Wolken bilden, weit unter den normalen Gefrierpunkt des Wassers erkalten, ohne daß ein Erstarren eintritt, wie man dies auch beim tropfbar-flüssigen Wasser beobachtet (Seite 507). Wenn nun aus einer höheren Wolkenschicht Graupelkörner durch eine in diesem Zustande befindliche Wolke herabfallen, so muß sich auf ihnen Wasser niederschlagen, welches augenblicklich erstarrt. Bei der niedrigen Temperatur der Wolke kann auf diese Art in ganz kurzer Zeit eine massenhafte Eisbildung stattfinden.

Mohr sucht die Hagelbildung auf das Hereinbrechen kalter Luftmassen aus höheren Regionen in tiefere, mit Wasserdampf gesättigte Luftschichten zurückzuführen.

Viertes Kapitel.

Optische Erscheinungen der Atmosphäre.

Farbe des Himmels. Der heitere Himmel erscheint uns blau, und 325
zwar ist dieses Blau, je nach dem Zustande der Atmosphäre, bald heller und weißlicher, bald dunkler; auf hohen Bergen erscheint der Himmel sehr dunkelblau, ja fast schwarz. Es ist dies leicht zu erklären; wenn die Luft absolut durchsichtig wäre, so daß die einzelnen Luftteilchen gar kein Licht reflektierten oder vielmehr zerstreuten, so müßte uns der Himmel vollkommen schwarz erscheinen; die Sonne, der Mond, die Sterne würden glänzend auf dem schwarzen Grunde stehen. Nun aber reflektieren die Luftteilchen das Licht, und so kommt es, daß bei Tage der ganze Himmel hell erscheint, weil die von der Sonne erleuchteten Luftteilchen das Licht nach allen Seiten hin zerstreuen. Diese Erleuchtung der Atmosphäre durch die Sonnenstrahlen ist die Ursache, daß wir die Sterne bei Tage nicht sehen können. Die Luftteilchen reflektieren vorzugsweise das blaue Licht, und deshalb scheint uns das an und für sich dunkle Himmelsgewölbe wie mit Blau überzogen. Je höher wir uns in die Atmosphäre erheben, desto dünner wird dieser blaue Überzug und desto dunkler wird uns also auch der Himmel erscheinen; so erscheint auch im Zenith der Himmel stets am dunkelsten blau und gegen den Horizont mehr weißlich.

Das reine Blau des Himmels wird besonders durch die in der Luft schwebenden feinen Nebel gebleicht, welche oft den Himmel mit einem leichten Schleier überziehen, ohne doch schon dicht genug zu sein, um als Wolken zu erscheinen.

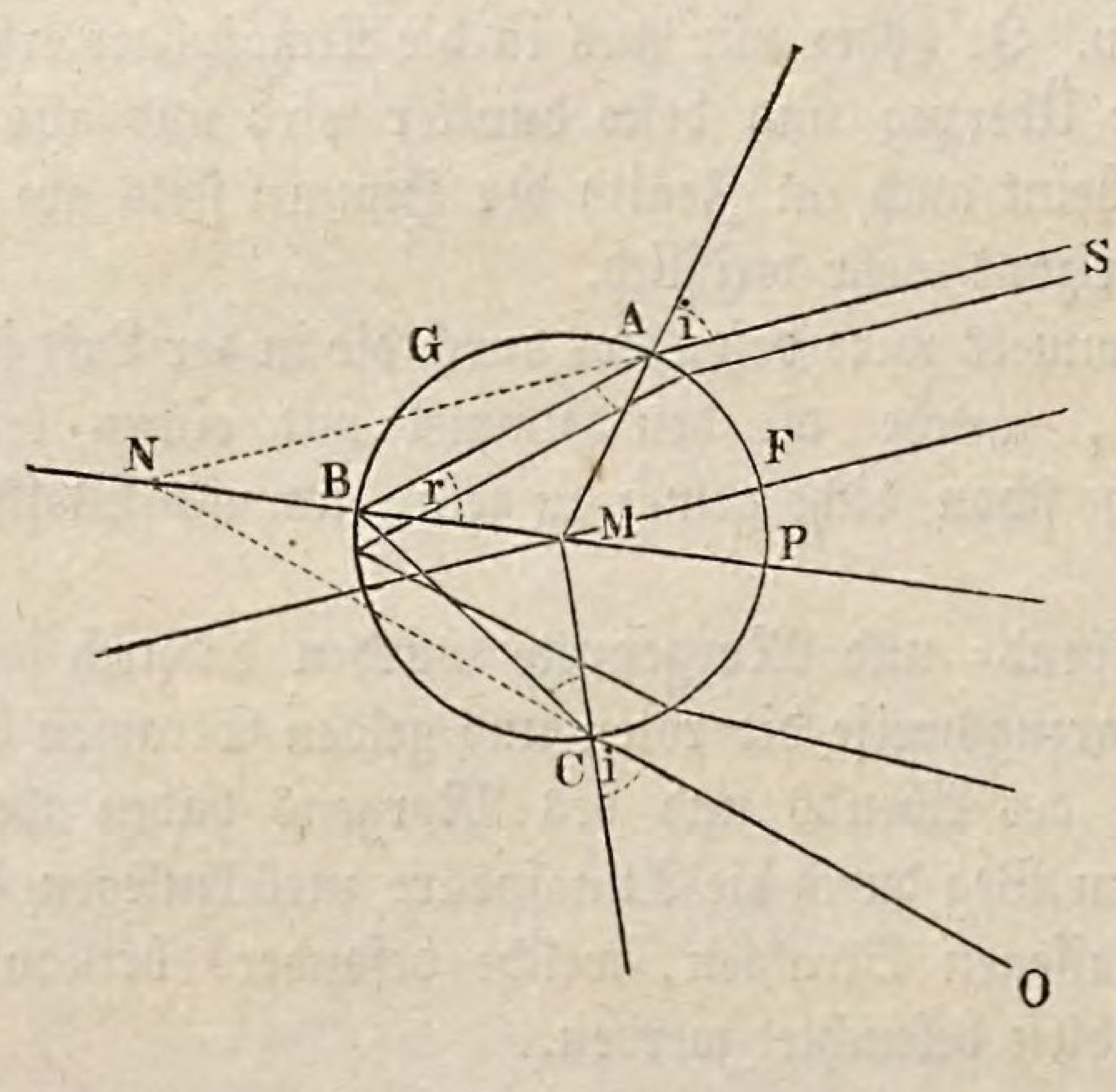
Die Erscheinungen der Abend- und Morgenröte wurden dadurch erklärt, daß man sagte, die Luft lasse vorzugsweise die roten und gelben Strahlen durch, sie reflektiere aber die blauen; des Abends und des Morgens haben aber die Sonnenstrahlen einen sehr weiten Weg durch die Atmosphäre zurückzulegen, daher die rote Färbung der durchgelassenen Strahlen, welche besonders brillant ist, wenn Wolken durch diese Strahlen beleuchtet werden.

Diese Meinung kann nicht ganz richtig sein, weil das Blau des Himmels durchaus nicht die komplementäre Farbe des Abendrotes ist. Das Abendrot rührt wahrscheinlich von dem in der Luft enthaltenen teilweise schon kondensierten Wasserdampfe her.

Wenn die Sonne am westlichen Horizonte verschwunden ist, so tritt nicht plötzlich die Dunkelheit ein, sondern eine Dämmerung, welche nach Umständen bald längere, bald kürzere Zeit dauert. Diese Dämmerung rührt daher, daß die Luft am westlichen Himmel und die in ihr schwebenden Wasserteilchen noch von der Sonne beschienen werden, nachdem sie unseren Blicken schon verschwunden ist, und daß diese erleuchteten Luft- und Wasserteilchen uns noch ein allmählich mehr und mehr abnehmendes Licht zusenden. In unseren Gegenden dauert die Dämmerung ungefähr bis die Sonne 18^0 unter dem Horizonte ist. Die längere Dauer der Dämmerung in höheren Breiten rührt besonders daher, daß die Sonnenbahn hier stark gegen den Horizont geneigt ist, daß es also lange dauert, bis sie 18^0 unter dem Horizonte steht. Je mehr wir uns dem Äquator nähern, desto weniger schräg ist die tägliche Sonnenbahn gegen den Horizont; unter dem Äquator selbst macht sie einen rechten Winkel mit demselben; in den heißen Ländern ist deshalb die Dämmerung von kürzerer Dauer. In Italien ist sie kürzer als bei uns, in Chili dauert sie nur $^1/_4$ Stunde, in Cumana nur einige Minuten. Diese kurze Dauer der Dämmerung läßt sich jedoch nicht allein durch die Neigung der Sonnenbahn gegen den Horizont erklären, sie hat zum Teil auch in der außerordentlichen Reinheit des Himmels ihren Grund; denn in unseren Gegenden tragen die zarten hoch in der Luft schwebenden Nebel, welche bei Tage den Himmel mit einem Schleier überziehen, die Lichtstrahlen aber stark reflektieren, sehr zur Verlängerung der Dämmerung bei.

326 **Der Regenbogen.** Es ist allgemein bekannt, daß man einen Regenbogen sieht, wenn man eine regnende Wolke vor sich und die Sonne im Rücken hat. Der Regenbogen bildet gleichsam die Basis eines Kegels, dessen Spitze das Auge ist und dessen Achse mit der geraden Linie zusammenfällt, welche man durch die Sonne und das Auge legen kann. Unter den eben angegebenen Bedingungen erscheint auch der Regenbogen in dem Staubregen der Wasserfälle und Springbrunnen.

Fig. 595.



Um den Regenbogen zu erklären, muß man den Weg der Sonnenstrahlen durch die Regentropfen verfolgen.

Wenn ein Sonnenstrahl SA, Fig. 595, einen Regentropfen trifft, so wird er gebrochen, und es ist leicht, die Richtung des gebrochenen Strahles AB zu berechnen oder zu konstruieren. Der gebrochene Strahl AB wird in B an der Rückwand des Tropfens nach C gespiegelt und tritt dann nach einer zweiten Brechung in der Richtung CO aus. Der austretende Strahl CO macht mit dem einfallenden einen Winkel SNO.

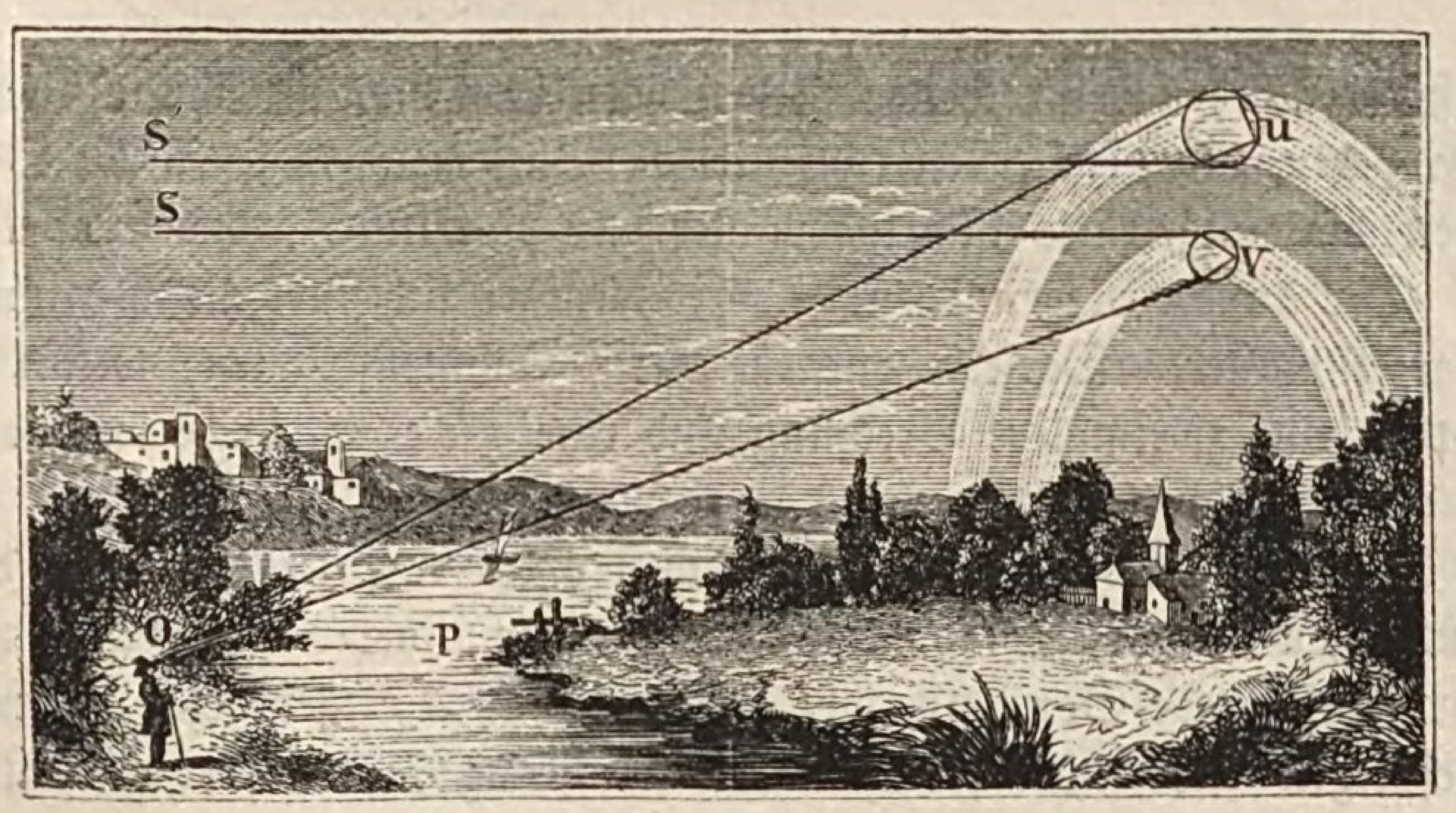
Es fallen aber parallel mit SA noch viele andere Sonnenstrahlen auf den Tropfen und wenn man für einige derselben den Weg durch den Tropfen berechnet oder konstruiert, wie dies in unserer Figur noch für einen zweiten geschehen ist, so ergiebt sich, daß die austretenden Strahlen im allgemeinen nicht unter einander parallel sind.

Während also ein paralleles Lichtbündel auf den Tropfen trifft, tritt ein stark divergierendes Strahlenbündel aus dem Tropfen aus. Es ist begreiflich, daß durch diese Divergenz der aus dem Tropfen kommenden Strahlen die Stärke des Lichteindruckes, den sie hervorbringen, ganz außerordentlich geschwächt wird, namentlich wenn die Tropfen in einer nur etwas bedeutenden Entfernung vom Auge sich befinden. Unter allen aus dem Tropfen nach zweimaliger Brechung und einmaliger Spiegelung ins Auge kommenden Strahlen können demnach nur diejenigen einen merklichen Lichteindruck machen, für welche diese Divergenz ein Minimum ist, oder mit anderen Worten, nur diejenigen, welche sehr nahe parallel austreten.

Bei genauerer Untersuchung ergiebt sich auch, daß eine ziemliche Menge parallel einfallender Strahlen den Tropfen in nahezu gleicher Richtung verläßt, und zwar für roteS Licht diejenigen, für welche der Winkel SNO nahe $42^0\ 30'$ ist; diese Strahlen werden unter allen aus dem Tropfen kommenden allein einen merklichen Lichteindruck hervorbringen können.

Denkt man sich durch die Sonne und das Auge des Beobachters eine gerade Linie OP, Fig. 596, gezogen und zieht man ferner durch O eine Linie OV so, daß der Winkel $POV = 42^0\,30'$, so werden nach der Richtung OV hin sich befindende Regentropfen nach einmaliger innerer Spiegelung wirksame

Fig. 596.



Strahlen ins Auge senden. Aber nicht allein in dieser Richtung empfängt das Auge wirksame rote Strahlen, sondern, wie leicht begreiflich, von allen Regentropfen, die in der Kegeloberfläche liegen, welche durch Umdrehung der Linie OV um die Achse OP entsteht; das Auge wird also einen lichten roten Kreis sehen, dessen Mittelpunkt auf der von der Sonne durch das Auge gezogenen Geraden liegt und dessen Halbmesser unter einem Winkel von $42^0\,30'$ erscheint.

In der erwähnten Richtung sieht man einen Kreis, der als ein roter Ring von 30′ Breite erscheint, weil die Sonne nicht ein Punkt, sondern eine Scheibe ist, die den scheinbaren Durchmesser von 30′ hat. Die wirksamen violetten Strahlen treten aber nach einer Richtung aus, welche einen Winkel von $40^0\,30'$ mit den einfallenden Strahlen macht, das Auge erblickt also einen violetten Ring von 30′ Breite, dessen Radius nur $40^0\,30'$ beträgt. Zwischen diesen äußersten Bogen erscheinen die der übrigen prismatischen Farben, und so bildet also gewissermaßen der Regenbogen ein zu einem kreisförmigen Bogen ausgedehntes Spektrum. Die ganze Breite des Regenbogens beträgt ungefähr 2^0, da ja der Halbmesser des roten Bogens um 2^0 größer ist als der des violetten.

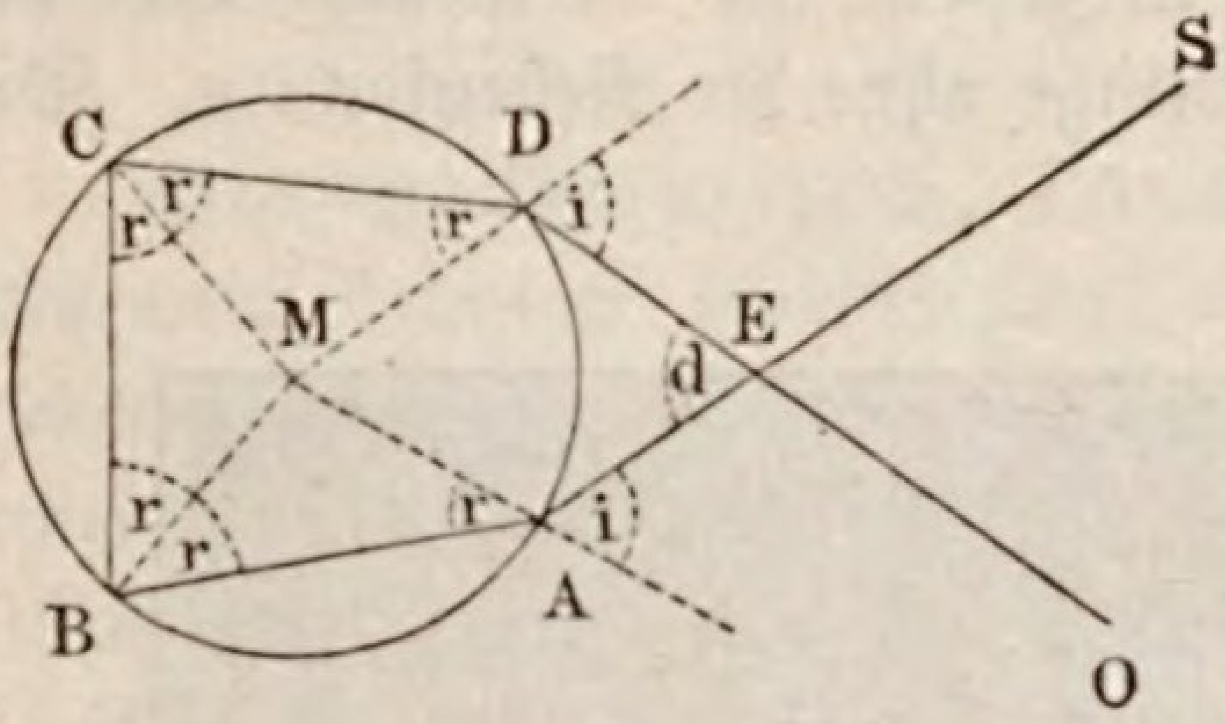
Was die Ausdehnung des farbigen Bogens betrifft, so hängt sie offenbar von der Höhe der Sonne über dem Horizonte ab. Wenn die Sonne eben auf- oder untergeht, so liegt der Mittelpunkt des Bogens gerade im Horizonte, weil die durch die Sonne und das Auge gezogene Linie eine horizontale ist. Für einen Beobachter in der Ebene bildet der Regenbogen gerade einen Halbkreis; dagegen kann er noch mehr als einen Halbkreis übersehen, wenn er auf einer isolierten Bergspitze von geringer Breite steht. Je höher die Sonne steht, desto tiefer liegt der Mittelpunkt des farbigen Bogens unter dem Horizonte, desto kleiner ist also das dem Auge sichtbare Bogenstück. Wenn die Sonne $42^0\,30'$ hoch steht, ist für den in der Ebene stehenden Beobachter gar kein Regenbogen mehr sichtbar, weil alsdann der Gipfel desselben gerade in den Horizont, der ganze Bogen also unter den Horizont fallen würde. Von den Masten der Schiffe sieht man oft Regenbogen, welche einen ganzen Kreis bilden; solche ganz kreisförmige Regenbogen sieht man auch oft an Wasserfällen und Springbrunnen.

Außer dem eben besprochenen Regenbogen sieht man gewöhnlich noch einen zweiten größeren, mit dem ersten konzentrischen, bei welchem jedoch die Ordnung der Farben die umgekehrte ist, indem sich das Rot innen, das Violett außen befindet. Der äußere Regenbogen ist weit weniger lichtstark als der innere, er erscheint weit blasser. Derselbe entsteht durch Sonnenstrahlen, welche in den Regentropfen eine zweimalige Brechung und eine zweimalige innere Reflexion erlitten haben.

In Fig. 597 ist der Gang eines Lichtstrahles dargestellt, welchen derselbe im Regentropfen nimmt und ihn nach zweimaliger innerer Spiegelung verläßt SA ist der einfallende Sonnenstrahl, welcher nach AB gebrochen, dann in B und C gespiegelt wird und bei D in der Richtung DO wieder austritt. In

diesem Falle schneiden sich der einfallende und der austretende Strahl und bilden einen Winkel *d* mit einander, dessen Größe veränderlich ist, je nachdem der einfallende Strahl den Tropfen an einer anderen Stelle, also auch unter einem anderen Einfallswinkel trifft.

Fig. 597.



In diesem Falle machen die austretenden wirksamen roten Strahlen einen Winkel von 50°, die austretenden wirksamen violetten Strahlen dagegen einen Winkel von $53^1/_2{}^0$ mit den einfallenden; das Auge erblickt also eine Reihe konzentrischer farbiger Ringe, deren innerster rot ist und 50° Halbmesser hat, während der äußerste violette Ring einen Halbmesser von $53^1/_2{}^0$ hat.

Da das Licht bei jeder Spiegelung eine Schwächung erleidet, so ist der äußere Regenbogen blasser, weil er durch Strahlen gebildet wird, welche eine zweimalige innere Spiegelung erlitten haben. Man würde noch einen dritten und einen vierten Regenbogen sehen können, welche durch Strahlen gebildet werden, die eine dreimalige und eine viermalige innere Spiegelung erlitten haben, wenn diese Strahlen nicht zu lichtschwach wären.

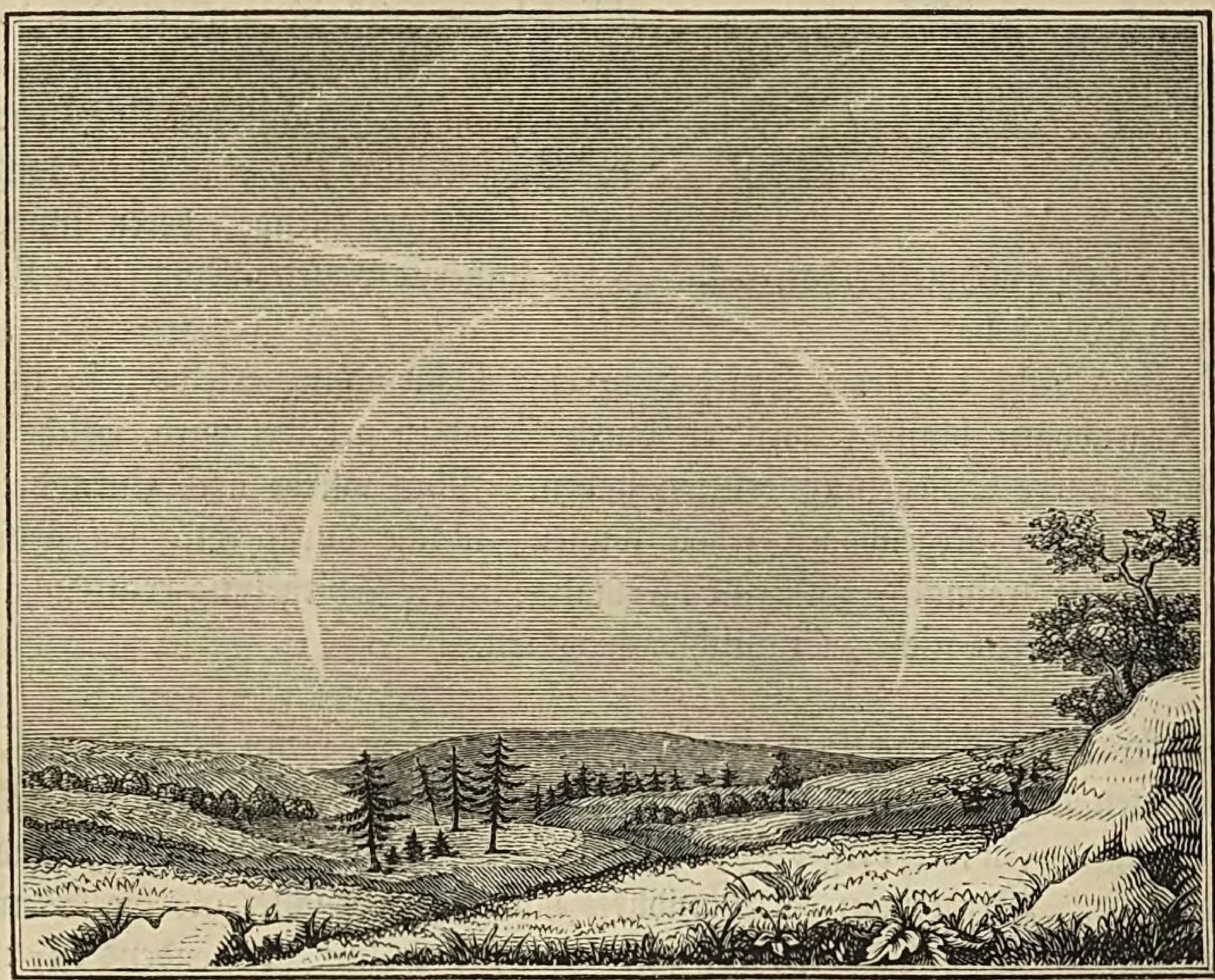
Höfe und Nebensonnen. Oft sieht man, wenn der Himmel mit einem leichten Wolkenschleier überzogen ist, dicht um die Sonne und den Mond farbige Ringe. In der Regel sieht man diese Ringe nicht vollständig, sondern nur stückweise. Wenn man die Mondhöfe häufiger beobachtet als die Sonnenhöfe, so liegt der Grund darin, daß das Licht der Sonne zu blendend ist; man sieht aber diese auch, sobald man das Bild der Sonne in ruhigem Wasser oder in einem auf der Rückseite geschwärzten Spiegel betrachtet. 327

Diese Höfe haben die größte Ähnlichkeit mit der Glorie, welche man um eine Kerzenflamme sieht, wenn man sie durch eine mit semen lycopodii bestreute Glasplatte betrachtet, und sicherlich sind die Höfe ebenso wie dieses Phänomen zu den Interferenzerscheinungen zu zählen; die Wassertröpfchen vertreten die Stelle der feinen Staubteilchen.

Bisweilen sieht man auch noch zwei größere lichte Kreise um die Sonne und den Mond, welche jedoch mit den Höfen nicht verwechselt werden dürfen; der Halbmesser des kleineren dieser hellen Ringe erscheint unter einem Winkel von 22 bis 23°; der des größeren aber unter einem Winkel von 46 bis 47°; das Rot ist bei denselben nach innen gekehrt, der innere Rand ist schärfer, der äußere mehr verschwommen und weniger deutlich gefärbt. Selten erscheinen die beiden Kreise zu gleicher Zeit. Fig. 598 (a. f. S.) stellt die Erscheinung dar, wie man sie wohl am häufigsten zu beobachten die Gelegenheit hat; es ist nämlich der kleinere Ring mit einem Radius von 22 bis 23°; derselbe ist von einem horizontalen lichten Streifen durchschnitten, welcher sich oft bis zur Sonne selbst erstreckt. Da, wo dieser Streifen den Lichtring durchschneidet, ist er am hellsten; diese hellen Streifen,

welche man zu beiden Seiten der Sonne am äußeren Umfange des Ringes sieht, sind die **Nebensonnen**; bisweilen erscheint eine solche Nebensonne auch vertikal über der Sonne im Gipfel des Ringes; manchmal erscheint hier aber auch ein Berührungsbogen, wie er in Fig. 598 dargestellt ist. Oft sieht man die Nebensonnen auch ohne die Ringe, oder die Ringe ohne die Nebensonnen. Die

Fig. 598.



Ringe und die Nebensonnen erscheinen ebenfalls nie bei ganz heiterem Himmel, sondern nur wenn derselbe mit einem Schleier überzogen ist.

Man hat die erwähnten Ringe durch eine Brechung des Lichtes in den in der Luft schwebenden Eisnadeln erklärt. Da die Eisnadeln sechsseitige Säulen sind, so bilden immer je zwei nicht parallele und nicht zusammenstoßende Säulenflächen einen Winkel von 60° mit einander; die Eisnadeln bilden also gewissermaßen gleichseitige, dreiseitige Prismen, für welche das Minimum der Ablenkung ungefähr 23° beträgt. Solche Strahlen nun, welche in den Eisnadeln das Minimum der Ablenkung erlitten haben, sind den wirksamen Strahlen des Regenbogens analog, weil viele Strahlen **sehr** nahe in derselben Richtung austreten. Diese Hypothese erklärt also zugleich die Bildung des Ringes, seine Größe und die Anordnung seiner Farben.

Der Ring von 46° erklärt sich durch die Annahme, daß die Achse der Prismen in der Weise schief steht, daß der rechte Winkel, welchen die Seitenflächen der Säule mit der Basis bilden, der brechende Winkel des Prismas wird. Für ein Eisprisma, dessen brechender Winkel 90° beträgt, ist in der That das Minimum der Ablenkung gleich 46°.

Den Nebensonnenstreifen erklärt man sich durch die Reflexion der Sonnenstrahlen an den vertikalen Flächen der Eisnadeln; er ist da am hellsten, wo er den Ring von 23° durchschneidet, weil hier zwei Ursachen stärkerer Erleuchtung zusammenwirken.

Sternschnuppen, Feuerkugeln und Meteorsteine. Eine allgemein bekannte Erscheinung, welche deshalb auch keiner weiteren Beschreibung bedarf, sind die Sternschnuppen. Durch korrespondierende Beobachtungen hat man ermittelt, daß das Aufleuchten der Sternschnuppen in einer Höhe von 20 bis 30, das Verlöschen derselben aber in einer Höhe von 8 bis 11 Meilen erfolgt. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Sternschnuppen die höheren Schichten der Atmosphäre durchlaufen, beträgt 80 000 bis 120 000 m in der Sekunde. 328

Eine höchst merkwürdige Erscheinung sind die periodisch wiederkehrenden Sternschnuppenschwärme, welche man in der Zeit vom 12. bis 14. November und am 10. August (dem Feste des heiligen Laurentius) beobachtet; das letztere Phänomen wird schon in einem alten englischen Kirchenkalender, unter dem Namen der feurigen Thränen des heiligen Laurentius, als eine wiederkehrende Erscheinung erwähnt. Einer der bedeutendsten Sternschnuppenschwärme wurde den 12. bis 13. November 1833 in Nordamerika beobachtet, wo die Sternschnuppen fast wie Schneeflocken zusammengedrängt erschienen, so daß innerhalb 9 Stunden deren 240 000 fielen.

Die Feuerkugeln sind mit den Sternschnuppen gleichen Ursprungs und gleicher Natur und unterscheiden sich von ihnen nur durch die Größe. Bei den großen Sternschnuppenschwärmen sah man Feuerkugeln unter den Sternschnuppen.

Die Feuerkugeln zerplatzen oft unter großem Getöse und lassen dann Steinmassen herabfallen, welche unter dem Namen der Meteorsteine oder der Aërolithen bekannt sind. Auch bei Tage hat man solche Meteorsteine aus kleinen graulichen Wolken ebenfalls unter starkem Getöse herabfallen sehen.

Die frisch gefallenen Meteorsteine sind noch heiß und infolge der Geschwindigkeit des Falles mehr oder minder tief in den Boden eingedrungen.

Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts war man sehr geneigt, das Herabfallen von Steinmassen aus der Luft für ein Märchen zu erklären; seitdem aber haben sich Meteorsteinfälle ereignet, welche von mehreren Personen beobachtet und durch sachkundige Männer gehörig konstatiert wurden. Dahin gehört besonders der Meteorsteinfall am 26. April 1803 bei Aigle im Departement de l'Orne, welchen Biot untersuchte, und der am 22. Mai 1808 zu Stannern in Mähren. Am 14. November 1835 (also zur Zeit der Sternschnuppenperiode) wurde im Departement de l'Ain durch einen Aërolithen ein Haus angezündet.

Die Meteorsteine haben eine eigentümliche Physiognomie, wodurch sie sich von allen irdischen Fossilien unterscheiden, dennoch aber sind sie unter einander wieder so verschieden, daß Chladni, welcher sich viel mit diesem Gegenstande beschäftigte, es für schwierig hielt, einen allgemeinen Charakter anzu-

geben. Besonders charakteristisch ist aber doch wohl der Gehalt an gediegenem Eisen, und eine pechartig glänzende, schlackige Rinde, welche von einer stattgehabten oberflächlichen Schmelzung herrührt.

Nach Gustav Rose werden die Meteorsteine in zwei Hauptklassen eingeteilt, nämlich in Eisenmeteorite und in Steinmeteorite. Die Eisenmeteorite bestehen entweder aus gediegenem Eisen, dem sogenannten Meteoreisen, oder aus einer Eisenmasse, welche verschiedene Silikate, häufig Olivinkörner, einschließt. Die Steinmeteorite bestehen meistens aus einer trachytischen Grundmasse, die aus verschiedenen, gewöhnlich magnesiahaltigen Silikaten zusammengesetzt und mit mehr oder weniger metallischem Eisen durchsetzt ist.

Man hat an verschiedenen Orten Steinmassen auf dem Boden gefunden, welche dem Gebirgssysteme jener Gegenden ganz fremd sind, aber mit notorischen Meteorsteinen die größte Ähnlichkeit haben, und ist deshalb berechtigt, auch diese für Aërolithen zu halten.

Die Masse der Meteorsteine ist sehr verschieden; man hat deren gefunden, welche nur mehrere Pfunde, und solche, welche bis zu 400 Centner wogen.

Durch die Untersuchungen Schiaparelli's ist zweifellos dargethan, daß die Sternschnuppen, Feuerkugeln und Meteorsteine Massen kosmischen Ursprungs sind, welche, wie die Kometen, entweder in parabolischen Bahnen sich bewegen oder in lang gestreckten Ellipsen um die Sonne kreisen und, in die Anziehungssphäre der Erde geratend, herabfallen. Die Feuer- und Lichterscheinung erklärt sich durch den Widerstand, welchen die Luft trotz ihrer Verdünnung in den oberen Schichten der Atmosphäre den mit kolossaler Geschwindigkeit in sie eindringenden Körpern entgegensetzt. Durch die Annahme, daß außer unzähligen, einzeln um die Sonne kreisenden Massen der Art ganze Schwärme derselben einen elliptischen Ring um die Sonne bilden, welcher an einer bestimmten Stelle die Erdbahn schneidet, lassen sich die periodischen Sternschnuppenfälle erklären.

Fünftes Kapitel.

Von der atmosphärischen Elektricität und dem Erdmagnetismus.

Atmosphärische Elektricität. Als Wall (1708) zum ersten- 329
mal an einem großen geriebenen Harzcylinder einen etwas lebhaften Funken und ein stärkeres Geräusch wahrnahm, sprach er alsbald die Idee aus, daß dieser Funken und dieses Knacken den Blitz und den Donner darzustellen scheinen. Den Beweis für die Richtigkeit dieser Analogie hat aber erst Franklin geliefert, welcher vorher schon mehrere elektrische Entdeckungen, besonders über die Leydener Flasche und die Eigenschaft der Spitzen gemacht hatte. Er kam auf den glücklichen Gedanken, durch Aufstellung von Metallspitzen auf einem hohen Turme die Elektricität in den Gewitterwolken nachzuweisen und sich durch solche Spitzen vor elektrischen Entladungen zu schützen. Da sich in Philadelphia damals kein für seine Zwecke passender Turm befand, so machte Franklin seine ersten Versuche mit einem Papierdrachen, den er steigen ließ, als sich am Himmel Gewitterwolken zeigten. Anfangs zogen mehrere Wolken wirkungslos vorüber; endlich fingen die Fasern der Schnur an sich aufzustellen, und es ließ sich ein Geräusch hören. Dadurch ermutigt, hielt Franklin den Finger gegen das Ende der Schnur, worauf ein Funken übersprang, dem bald noch andere folgten.

Franklin hatte seinen Versuch im Jahre 1752 angestellt, er wurde überall mit demselben Erfolge wiederholt. De Romas zu Nerac war, durch den ersten Gedanken Franklins geleitet, ebenfalls auf die Idee gekommen, einen Drachen statt der hochgestellten Spitzen anzuwenden. Ohne von Franklin's Resultaten Kunde zu haben, erhielt er im Jahre 1753 sehr kräftige Zeichen von Elektricität, weil er die glückliche Idee hatte, die Schnur ihrer ganzen Länge nach mit einem feinen Metalldraht zu durchziehen. Im Jahre 1753 wiederholte de Romas seine Versuche und erhielt Funken von überraschender Größe.

Diese Versuche beweisen vollständig, daß der Blitz nur ein elektrischer Funken ist.

330 **Elektricität während der Gewitter.** Wenn man den elektrischen Zustand der Wolken untersucht, welche nach und nach über den Drachen hinziehen, so erkennt man, daß sie bald mit positiver, oder negativer Elektricität geladen sind, bald sich aber auch im natürlichen Zustande befinden. Obgleich wir über die Verbreitung der Elektricität in den Wolken nichts wissen, so ist doch wohl die Anziehung und Abstoßung der ungleich oder gleich elektrisierten Wolken die Ursache der außergewöhnlichen Bewegungen, welche man während der Gewitter am Himmel beobachtet.

Haben die Wolken einen hinreichenden Grad elektrischer Ladung erreicht und befinden sie sich in der Nähe anderer Wolken oder irdischer Gegenstände, gegen welche sie sich entladen können, so kommt das Gewitter zum Ausbruch. Jede Entladung ist von einer Lichtentwickelung, dem Blitz, und von einer Lufterschütterung begleitet, von welcher der Donner herrührt. Eine Entladung, durch welche ein Körper der Erdoberfläche getroffen wird, bezeichnet man als Blitzschlag.

Nach Arago unterscheidet man Linien-, Flächen- und Kugelblitze. Die Blitze der ersten Art sind geschlängelte, schmale und scharf begrenzte Lichtstreifen, welche der Form nach mit langen Funken kräftiger Elektrisiermaschinen oder größerer Ruhmkorff'scher Apparate die größte Ähnlichkeit haben. Solche Blitze schlagen häufig zwischen zwei Wolken oder auch zwischen einer Wolke und einem Gegenstand auf der Erde über; sie sind oft Meilen lang, wie man am besten übersehen kann, wenn man auf einem hohen Berg ein Gewitter unter sich in der Tiefe zu beobachten Gelegenheit hat.

Die Blitze der zweiten Art sind flächenartig ausgebreitet und haben eine etwas längere Dauer als die Linienblitze; sie entsprechen dem Büschellicht der Elektrisiermaschine.

Die Blitze der dritten Art, welche mit der Elektrisiermaschine bis jetzt nicht nachgewiesen werden können, gleichen Feuerkugeln, welche sich verhältnismäßig so langsam aus den Wolken gegen die Erde bewegen, daß sie mehrere Sekunden sichtbar bleiben, und dann bald mit, bald ohne Knall dieselben Wirkungen hervorbringen wie ein gewöhnlicher Blitzschlag.

Hier ist noch des Wetterleuchtens zu erwähnen, welches wohl nur der Widerschein sehr entfernter Blitze ist.

Der Donner entsteht durch die Vibrationen der gewaltsam erschütterten Luft. Man sieht das Licht gleichzeitig auf der ganzen Bahn des Blitzes, und auf der ganzen Strecke entsteht auch gleichzeitig der Knall; da aber der Schall in jeder Sekunde nur 340 m zurücklegt, so hört man den Donner später, als man den Blitz sieht; ein Beobachter, welcher sich nahe an dem einen Ende der Bahn des Blitzes befindet, wird also den in allen Punkten gleichzeitig entstehenden Knall nicht gleichzeitig hören. Nehmen wir an, der Blitz sei 3400 m lang und der Beobachter befinde sich in der Verlängerung seiner Bahn, so wird der Schall von dem entfernteren Ende des Blitzes um 10 Sekunden später ankommen,

als von dem zunächst gelegenen Ende. Da demnach der Schall von den verschiedenen Stellen des Blitzes nur nach und nach zum Ohre des Beobachters gelangt, so hört er also nicht einen momentanen Knall, sondern, je nach der Länge des Blitzes und seiner Stellung gegen die Bahn desselben, ein länger oder kürzer dauerndes Rollen des Donners, welches wohl durch ein Echo in den Wolken verstärkt wird.

Über den Ursprung der atmosphärischen Elektricität weiß man bis jetzt nichts Gewisses, obgleich schon mancherlei Hypothesen über diesen Gegenstand aufgestellt worden sind.

Wirkungen des Blitzes auf der Erde. Wenn eine elektrische Wolke über dem Erdboden schwebt, so wird sie verteilend auf denselben wirken; die der Wolke gleichnamige Elektricität wird abgestoßen, die ungleichnamige aber wird angezogen und vorzugsweise in solchen Leitern und Halbleitern angehäuft, die sich mehr oder weniger hoch über den Boden erheben. 331

Eine allmähliche Entladung der elektrischen Wolke oder ein Weiterziehen derselben hat zur Folge, daß auch die durch Verteilung angehäuft gewesene Elektricität sich allmählich verliert, während eine plötzliche Ausgleichung, ein Rückschlag, erfolgt, wenn die elektrische Wolke plötzlich, etwa durch Überschlagen eines Blitzes, auf eine andere Wolke entladen wird.

Wenn aber die elektrische Wolke nahe und die durch sie bewirkte elektrische Ladung irgend eines unter ihr auf der Erdoberfläche befindlichen Gegenstandes stark genug geworden ist, so schlägt der Blitz direkt zwischen ihnen über. Alles, was sich über die Ebene erhebt, ist vorzugsweise dem Blitzschlage ausgesetzt; daher kommt es, daß so oft Tiere mitten im Felde erschlagen werden; unter sonst gleichen Umständen ist man jedoch auf einem nichtleitenden Boden sicherer als auf einem gut leitenden.

Bäume sind schon durch die Säfte, welche in ihnen cirkulieren, gute Leiter; wenn daher eine Gewitterwolke über ihnen hinzieht, so findet in den Bäumen eine starke Anhäufung von Elektricität statt, und deshalb sagt man mit Recht, daß Bäume den Blitz anziehen. Man darf deshalb während eines Gewitters unter Bäumen, namentlich unter einsam stehenden Bäumen, ja selbst unter einsam in der Ebene stehenden Sträuchen, keinen Schutz suchen. Warnende Beispiele bietet unter anderen ein Gewitter, welches am 10. Juli 1855 zwischen 7 und 9 Uhr morgens die ganze badische Rheinebene und einen Teil des Schwarzwaldes überzog. Während desselben erschlug der Blitz bei Thunsel oberhalb Freiburg einen Ackerknecht samt seinen beiden Pferden auf dem Heimwege; im Amte Durlach suchten vier Personen unter einem 40 Fuß hohen Birnbaume Schutz vor dem Regen; ein Blitzschlag, welcher den Baum traf, tödtete zwei derselben, während die beiden anderen gelähmt wurden. In der Nähe von Bruchsal endlich schlug der Blitz in eine Torfhütte, in welche sich mehrere Torfgräber geflüchtet hatten, und tödtete zwei derselben.

Gebäude sind in der Regel aus Metall, Steinen und Holz zusammengesetzt. Wegen der ungleichen Leitungsfähigkeit dieser Substanzen ist auch die

Wirkung der Gewitterwolken auf dieselben sehr verschieden. Wenn der Blitz einschlägt, so trifft er vorzugsweise die besseren Leiter, mögen sie nun frei oder in schlechteren Leitern eingehüllt sein; die verteilende Kraft der atmosphärischen Elektricität wirkt auf den in die Wand eingeschlagenen Nagel eben so gut, wie auf die frei in die Luft ragende Windfahne.

Die mechanischen Wirkungen des Blitzes sind in der Regel sehr heftig. Wenn der Blitz in ein Zimmer einschlägt, so werden die Möbel umgestürzt und zertrümmert, Metallstücke werden aus der Wand gerissen und fortgeschleudert. Bäume werden vom Blitz gespalten und zersplittert, gewöhnlich aber kann man vom Gipfel bis zum Boden eine mehrere Centimeter breite und tiefe Furche verfolgen, die abgeschälte Rinde und die ausgerissenen Späne findet man weit weggeschleudert, und am Fuße des Baumes sieht man oft ein Loch, durch welches das elektrische Fluidum sich in den Boden verbreitete.

Die physikalischen Wirkungen des Blitzes beweisen eine mehr oder minder bedeutende Temperaturerhöhung. Wenn der Blitz ein Strohdach, trockenes Holz, ja grüne Bäume trifft, so findet eine Verkohlung, meistens sogar eine Entzündung statt; bei Bäumen findet man jedoch seltener Spuren von Verkohlung. Metalle werden durch den Blitz stark erhitzt, geschmolzen oder verflüchtigt. Wiederholte Blitzschläge bringen auf hohen Bergen sichtbare Spuren von Schmelzung an den Felsen hervor.

332 **Der Blitzableiter** besteht aus einer zugespitzten Metallstange, welche in die Luft hineinragt, und einem guten Leiter, welcher die Stange mit dem Boden verbindet. Folgende Bedingungen müssen erfüllt sein, wenn er seinem Zweck entsprechen soll.

1) Die Stange muß in eine feine Spitze zulaufen.

2) Die Verbindung mit dem Boden muß vollkommen leitend sein; von der Spitze bis zum unteren Ende der Leitung darf keine Unterbrechung stattfinden.

Wenn eine Gewitterwolke über dem Blitzableiter schwebt, so werden die verbundenen Elektricitäten des Stabes und der Leitung zerlegt, diejenige Elektricität wird abgestoßen, welche mit der der Wolke gleichnamig ist, und sie kann sich frei im Boden verbreiten; die entgegengesetzte Elektricität aber wird nach der Spitze gezogen, wo sie frei in die Luft ausströmen kann. Auf diese Weise ist keine Anhäufung von Elektricität im Blitzableiter möglich. Während so der Blitzableiter in Thätigkeit ist, und ihn die entgegengesetzten Elektricitäten in entgegengesetzter Richtung durchströmen, kann man sich ihm ohne Gefahr nähern, man kann ihn ohne Gefahr berühren; denn wo keine elektrische Spannkraft vorhanden ist, ist auch kein Schlag zu befürchten.

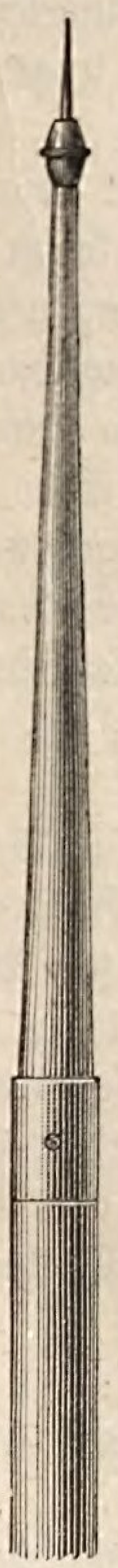
Nehmen wir nun an, eine der beiden oben genannten Bedingungen sei nicht erfüllt, die Spitze sei stumpf, oder die Leitung zum Boden sei unvollkommen oder unterbrochen, so ist klar, daß eine Anhäufung von Elektricität im Blitzableiter nicht allein möglich, sondern auch, daß sie unvermeidlich ist; er bildet dann einen geladenen Konduktor, in welchem eine ungeheuere Menge von Elek-

tricität angehäuft sein kann; man kann bald schwächere bald stärkere Funken aus ihm ziehen.

Wenn nur die Spitze stumpf ist, so kann der Blitz leichter einschlagen, allein er wird der Leitung folgen, ohne dem Gebäude zu schaden.

Wenn die Leitung unterbrochen oder die Verbindung mit dem Boden unvollkommen ist, so kann der Blitz ebenfalls einschlagen, er wird sich aber auch seitwärts auf andere Leiter verbreiten und eben solche Zerstörungen anrichten, als ob gar kein Blitzableiter vorhanden wäre.

Fig. 599.



1/8

Ein Blitzableiter welcher diesen Fehler hat, ist sehr gefährlich, selbst wenn der Blitz nicht einschlägt; denn wenn an irgend einer Stelle der Leitung die Elektricität hinlänglich angehäuft ist, so kann ein Funken seitwärts überschlagen, welcher benachbarte Gegenstände zertrümmern oder entzünden kann.

Fig. 599 stellt die Spitze eines Blitzableiters dar, wie sie nach Gay-Lussac's Vorschrift in Frankreich meistens ausgeführt werden. Auf einer ungefähr 5 m hohen Eisenstange ist ein 60 cm langer, etwas konischer Messingstab aufgeschraubt, in welchen oben mittels Silber eine ungefähr 5 cm lange Platinnadel eingelötet ist.

In Deutschland ist die eiserne Stange selbst zugespitzt, die Spitze ist aber vergoldet, damit sie nicht durch Oxydation abgestumpft werde.

Die oben zugespitzte Saugstange des Blitzableiters muß über der höchsten Stelle des zu schützenden Gebäudes aufgerichtet werden. Mit dem Boden wird sie durch eiserne Stangen oder durch ein Seil, welches aus 3 oder 4, etwa 3 mm dicken Kupferdrähten hergestellt ist, in leitende Verbindung gesetzt.

Es ist wesentlich, daß diese Ableitung möglichst vollständig sei. Wenn irgend ein Brunnen in der Nähe ist, so wird die metallische Leitung desselben bis in das Wasser geführt; wenn aber kein Wasser in der Nähe ist, so sollte die Leitstange wenigstens durch einen langen, mit Kohlenpulver gefüllten Kanal zu einer möglichst feuchten Stelle des Bodens geführt werden.

Wie sehr der Blitzschlag guten Leitungen folgt, hatte man z. B. bei einem heftigen Gewitter am 9. Juni 1849 zu Basel zu beobachten Gelegenheit. Der Blitz schlug in den Blitzableiter eines Wohnhauses, verfolgte die Leitung desselben bis in den Boden, sprang aber alsdann auf eine naheliegende gußeiserne Brunnenleitung über; auf mehr als 1/4 Stunde Wegs wurden alle gußeisernen Röhrenstücke da, wo sie in einander gesteckt und mit Pech gedichtet waren, zerschmettert, so daß alle durch diese Leitung gespeisten Brunnen zu laufen aufhörten.

Die Elektricität, welche in reichlichem Maße durch die Spitze ausströmt wird durch die Gewitterwolke angezogen, und neutralisiert, wenn sie daselbst angekommen ist, einen Teil der ursprünglichen Elektricität dieser Wolke. Wenn

also eine Gewitterwolke dem Blitzableiter nahe genug ist, um verteilend wirken zu können, so wird auch sogleich ihre elektrische Kraft durch das Zuströmen der entgegengesetzten Elektricität aus der Spitze geschwächt. Je mehr sich die Wolke nähert, desto stärker wirkt ihre verteilende Kraft, desto mehr wird sie aber auch durch das Zuströmen der entgegengesetzten Elektricität neutralisiert.

Es versteht sich von selbst, daß die Spitze des Blitzableiters, wenn derselbe wirksam sein soll, nicht von benachbarten Leitern überragt werden darf. Ferner müssen alle bedeutenden Metallmassen der zu schützenden Gebäude mit dem Blitzableiter in leitende Verbindung gebracht werden.

Die Erfahrung zeigt, daß ein mit allen Vorsichtsmaßregeln angelegter Blitzableiter von den angegebenen Dimensionen einen Umkreis von ungefähr 80 Fuß Radius schützt.

Da es also von der größten Wichtigkeit ist, daß die metallische Leitung von der Spitze des Ableiters bis zum Boden ununterbrochen sei, so ist es wünschenswert, sich davon überzeugen zu können, daß diese Bedingung erfüllt sei. In neuerer Zeit hat man dazu den galvanischen Strom angewandt. Führt man nämlich von dem einen Pole einer galvanischen Kette einen Kupferdraht zum oberen, vom anderen Ende einen solchen zum unteren Ende des Blitzableiters, so ist derselbe in den Schließungsbogen der Kette eingeschaltet. Ein an passender Stelle in diesen Schließungsbogen eingeschaltetes Galvanometer muß unter diesen Umständen den Strom anzeigen, wenn die Leitung nicht unterbrochen ist.

333 **Die magnetischen Kurven.** Nach dem, was bereits in Paragraph 185 besprochen wurde, verhält sich die ganze Erdkugel wie ein großer Magnet. An jedem einzelnen Orte der Erdoberfläche ist die magnetische Wirkung des Erdmagnetismus durch die Deklination, die Inklination und die magnetische Intensität charakterisiert. Nachdem nun diese Größen für viele möglichst weit von einander entfernte Orte bestimmt worden sind, erhält man ein Bild von der Verteilung des Magnetismus auf der Erde, wenn man nach Art der Isothermen magnetische Kurven auf Erdkarten oder Erdgloben aufträgt.

Man unterscheidet dreierlei Arten magnetischer Kurven, nämlich:

1) die isogonischen Linien, Linien gleicher magnetischer Deklination,

2) die isoklinischen Linien, Linien gleicher magnetischer Inklination und

3) die isodynamischen Linien, Linien gleicher magnetischer Intensität.

Die Fig. 600 ist eine Deklinationskarte, d. h. sie stellt den Verlauf der isogonischen Linien dar und zwar zwischen dem 80. Grade nördlicher und dem 60. Grade südlicher Breite. Die ausgezogenen Kurven entsprechen westlicher, die punktierten aber östlicher Deklination. Auf den mit 0 bezeichneten, stärker gezogenen Kurven zeigt die horizontale Magnetnadel genau nach Norden.

Fig. 601 (a. f. S.) stellt den Verlauf der *isoklinischen Linien* dar. Die in derselben mit 0 bezeichnete, etwas stärker gezogene und dadurch vor den übrigen *isoklinischen Kurven* ausgezeichnete Linie ist der *magne-*

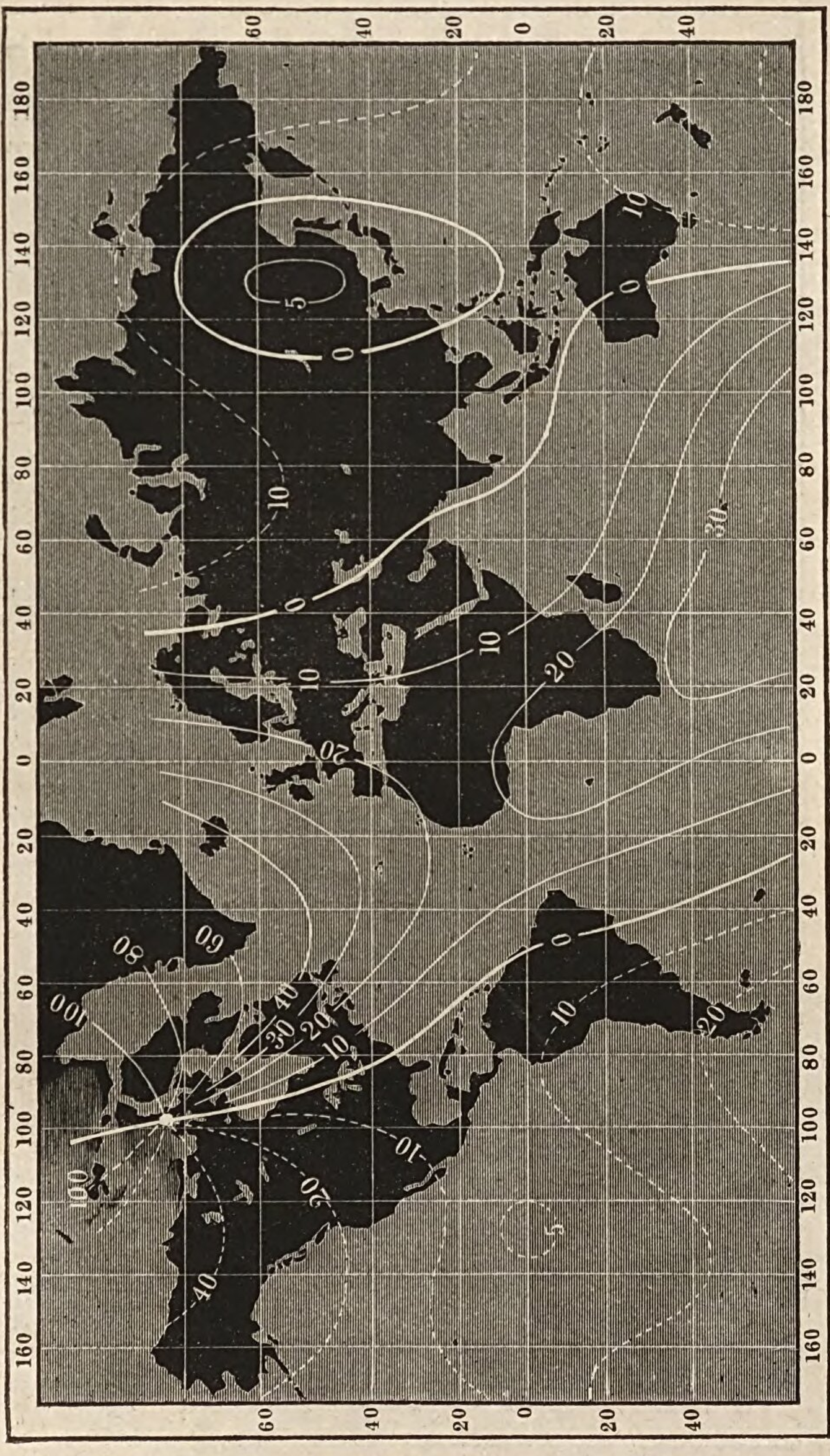


Fig. 600.

tische Äquator. Nördlich von demselben senkt sich das Nordende, südlich das Südende der Inklinationsnadel.

Die magnetischen Pole der Erde sind diejenigen Punkte, in welchen sich die

Inklinationsnadel senkrecht stellt. Der magnetische Nordpol, welchen Kapitän Roß auf der Insel Melville wirklich erreichte, findet sich auf den Karten Fig. 600 und 601. Der magnetische Südpol, auf dessen Lage

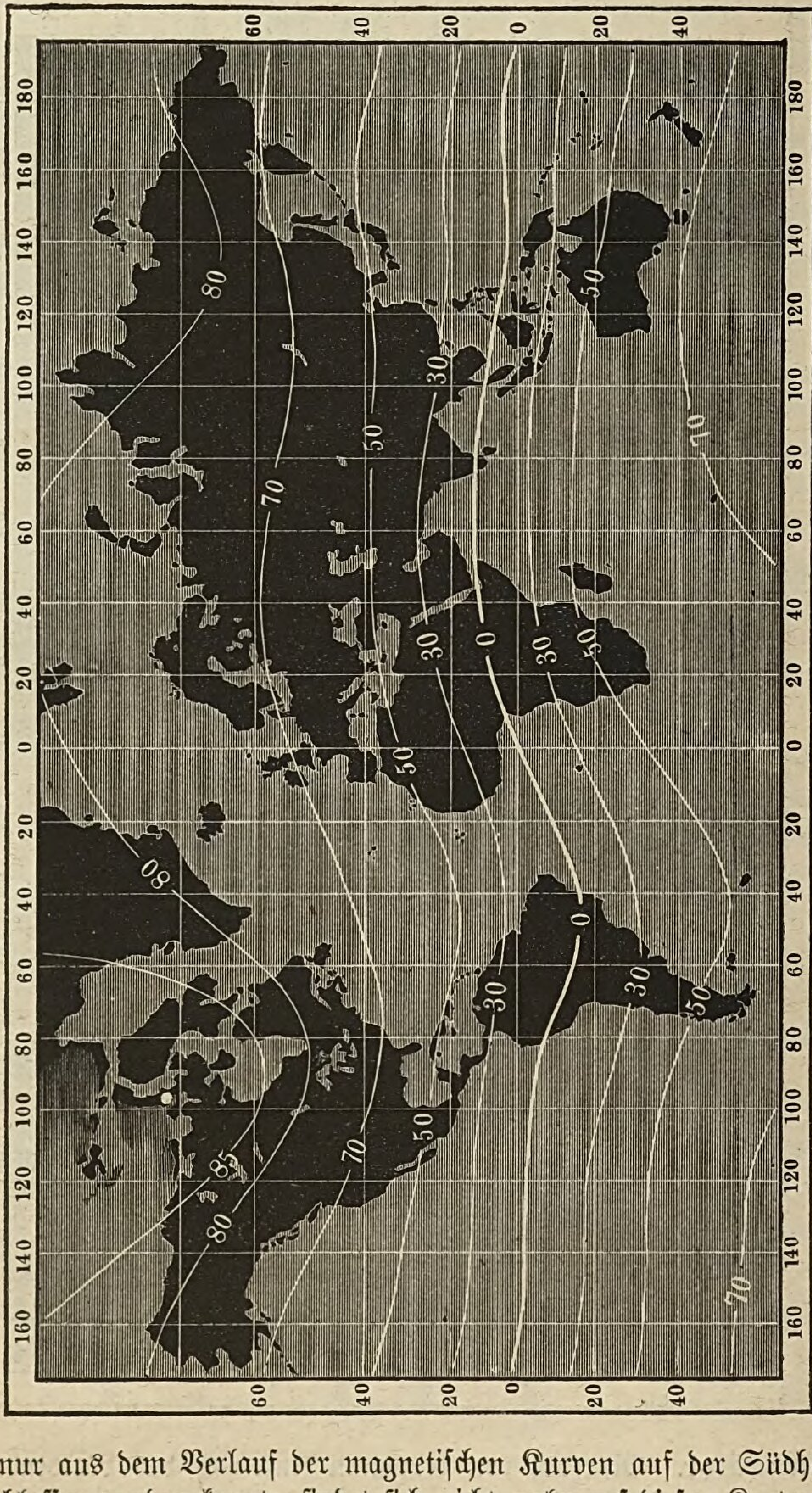


Fig. 601.

bis jetzt nur aus dem Verlauf der magnetischen Kurven auf der Südhälfte der Erde geschlossen werden konnte, findet sich nicht mehr auf diesen Karten.

Wäre der Erdmagnetismus regelmäßig verteilt, so müßte der magnetische

Äquator einen größten Kreis bilden, ähnlich wie die Ekliptik am Himmelsgewölbe, und die beiden magnetischen Pole der Erde müßten einander diametral gegenüber stehen. Aus Fig. 601 erkennt man den unregelmäßigen Verlauf des magnetischen Äquators, welcher die unregelmäßige Verteilung des Erdmagnetismus anzeigt, infolge deren denn auch die beiden magnetischen Pole der Erde keineswegs einander diametral gegenüberstehen.

Nach dem, was bereits in Paragraph 187 über die sekularen Variationen des Erdmagnetismus gesagt wurde, ist klar, daß der Verlauf der magnetischen Kurven sich allmählich ändern müsse, und in der That zeigen die magnetischen Karten von Anfang des vorigen Jahrhunderts ein ganz anderes Bild als die obigen Karten, welche für das Jahr 1860 konstruiert sind. Aus der allmählichen Veränderung in der Lage der magnetischen Kurven ergiebt sich auch, daß die magnetischen Pole der Erde nach und nach ihre Stelle ändern müssen.

Die Quelle des Erdmagnetismus ist höchst wahrscheinlich in thermoelektrischen Strömen zu suchen, welche durch die Einwirkung der Sonne auf die Erdoberfläche erregt werden.

Das Nordlicht. Wir haben bereits in Paragraph 187 gesehen, daß unter den Ursachen, welche unregelmäßige Schwankungen, Störungen, der Magnetnadel bewirken, das Nordlicht eine wesentliche Stelle einnimmt. In unseren Gegenden ist das Nordlicht eine ziemlich seltene Erscheinung; in höheren Breiten aber, in den nördlichen Teilen von Europa, Asien und Amerika, sind die Nordlichter nicht allein weit häufiger, sondern auch weit prächtiger. 334

Fig. 602.



Fig. 602 (a. v. S.) stellt das Nordlicht dar, wie es bei uns gewöhnlich wahrgenommen wird, wenn es seine volle Ausbildung erreicht; ein aus lichten Streifen gebildeter Bogen, dessen Ränder verwaschen erscheinen und dessen Enden auf dem Horizont aufzustehen scheinen.

Der Gipfel dieses Bogens steht immer nahe in der Richtung des magnetischen Meridians.

Der Glanz des Nordlichts zeigt eine undulatorische Bewegung, d. h. derselbe wächst der Reihe nach von einem Fuß zum andern und zwar meist in der Richtung von West nach Ost.

In höheren Breiten steigen die Nordlichter schon hoch über den Horizont hinauf, ja sie erreichen das Zenith und gehen selbst über dasselbe hinaus. Manchmal verläßt dann einer der Füße, oder auch beide, den Horizont, und es bildet sich dann die sogenannte Krone. Im hohen Norden erscheint der Lichtbogen oft als ein langes Strahlenband, Fig. 603, welches sich windet und

Fig. 603.



biegt wie eine Schlange oder eine vom Winde bewegte Fahne; die Strahlen, welche nun eine große Lichtstärke erlangt haben, färben sich an der Basis rot, in der Mitte grün, während der übrige Teil ein blaßgelbes Licht behält.

Die Krone verschwindet in der Regel schon nach einigen Minuten.

Nicht immer bildet sich das Nordlicht vollständig, sondern oft nur teilweise aus, indem bald die Krone, bald die Bogen unvollständig sind und die Regelmäßigkeit der Erscheinung in mannigfacher Weise durch Wolken gestört wird. Oft bemerkt man gegen Norden hin die Spuren eines Nordlichts als einen ungewöhnlichen verschwommenen Lichtschimmer.

Ähnliche Erscheinungen sind von den Seefahrern auch in den Polargegenden der südlichen Hemisphäre beobachtet worden; man kann sie Südlichter nennen und das Phänomen der beiden Hemisphären unter dem Namen des Polarlichtes zusammenfassen.

Der Umstand, daß die Nordlichter stets in der Richtung des magnetischen Meridians gesehen werden, daß bei ihrem Erscheinen die Deklinationsnadel in ungewöhnlich starkes Schwanken gerät, deutet darauf hin, daß das Nordlicht zu dem Erdmagnetismus und den um die Erde kreisenden elektrischen Strömen in Beziehung steht; weshalb sie denn auch **Humboldt** sehr treffend als **magnetische Gewitter** bezeichnete.

Die Erscheinung der Polarlichter ist offenbar einer in der Nähe der magnetischen Pole und zwar in den höheren Luftregionen stattfindenden elektrischen Ausströmung zuzuschreiben.

Sammlung

von

Aufgaben

zum

Grundriß der Physik

und

Meteorologie

von

Dr. Johann Müller.

Einleitung.

Specifisches Gewicht.

(Zu §. 9.)

1. Man hat gefunden, daß 6 Kubikcentimeter Kupfer 53 Gramm wiegen; wie groß ist das specifische Gewicht des Kupfers?

2. Ein Marmorblock wiegt 59 Kilogramm; wie viel Kubikdecimeter beträgt sein Rauminhalt, wenn das specifische Gewicht des Marmors gleich 2,84 ist?

3. Wie viel wiegt eine Eisenmasse von 6,8 Kubikdecimetern Inhalt, wenn das specifische Gewicht des Eisens 7,8 ist?

4. Eine Bleikugel soll 500 Gramm wiegen, wie groß muß ihr Durchmesser sein, wenn das specifische Gewicht des Bleis 11,3 ist? (Elemente der ebenen Geometrie und Stereometrie. 3. Aufl. S. 115.)

5. Welchen Raum in Kubikcentimetern nehmen 6 Kilogramm Quecksilber vom specif. Gewichte 13,598 ein?

6. Was wiegen 100 Liter absoluten Weingeistes (specif. Gewicht 0,793)?

7. Welchen Raum nehmen 500 Gramm gasförmiger Kohlensäure ein, wenn das specifische Gewicht derselben 0,00198 ist?

8. Welchen Raum nehmen 500 Gramm Wasserstoffgas ein, wenn das specifische Gewicht desselben 0,0000894 ist?

9. In ein vertikalstehendes cylindrisches Gefäß von 1 Decimeter innerem Durchmesser werden 12 Kilogramm Quecksilber gegossen. Bis zu welcher Höhe wird es den Cylinder füllen?

10. Ein 21 Kilogramm schwerer cylindrischer Stab von Eisen ist 2,5 Meter lang, wie groß ist sein Durchmesser?

11. Ein Quecksilbersäulchen, welches in einer Kapillarröhre eine Länge von 137 Millimeter einnimmt, wiegt 1 Gramm. Wie groß ist der Durchmesser des Röhrchens.

12. Welches ist der Preis einer gußeisernen Röhrenleitung von 2134 Meter Länge, 0,245 Meter innerem Durchmesser und 0,014 Meter Wanddicke, wenn das specifische Gewicht des Gußeisens 7,2 ist und 1 Kilogramm desselben 15 Pfennig kostet.

Erstes Buch.

Mechanik.

Parallelogramm der Kräfte.

(Zu §. 16.)

Die folgenden 6 Aufgaben sind durch geometrische Konstruktion zu lösen. Zur Ausführung dieser Konstruktion kann man sich in Ermangelung anderer der Maßstäbe und des Transporteurs bedienen, welche Dr. J. Müller's Elementen der ebenen Geometrie und Stereometrie (Braunschweig 1880) beigegeben sind.

13. Auf einen materiellen Punkt wirken zwei Kräfte von 8 und 5 Kilogramm, deren Richtungen einen Winkel von 45^0 mit einander bilden; wie groß ist ihre Resultierende und welchen Winkel macht sie mit der kleineren der beiden Seitenkräfte?

14. Die Resultierende zweier auf einen Punkt wirkender Kräfte von 5 und 7 Kilogramm ist gleich 9 Kilogramm; welchen Winkel machen die Richtungen der Seitenkräfte mit einander?

15. Unter welchem Winkel müssen zwei Seitenkräfte von 5 und 7 Kilogramm zusammenwirken, wenn ihre Resultierende gleich 4 Kilogramm sein soll?

16. Jede der beiden Seitenkräfte sei gleich 5 Kilogramm, der Winkel, welchen sie mit einander machen, sei 63^0; wie groß ist die Resultierende?

17. Jede der beiden Seitenkräfte sei 5 Kilogramm; unter welchem Winkel müssen sie zusammenwirken, wenn ihre Resultierende gleich 8 Kilogramm, und unter welchem Winkel, wenn die Resultierende gleich 2 Kilogramm sein soll?

18. Wie groß müssen zwei gleiche Seitenkräfte sein, deren Resultierende gleich 8 Kilogramm sein soll, wenn sie unter einem Winkel von 50^0 auf einen materiellen Punkt wirken?

18a. Eine Kraft von 4 Kilogramm ist durch zwei Seitenkräfte von solcher Richtung zu ersetzen, daß die eine einen Winkel von 30^0, die andere einen Winkel von 60^0 mit ihr macht. Wie groß sind diese Seitenkräfte?

18b. Eine Kraft von 5 Kilogramm ist durch zwei Seitenkräfte zu ersetzen, deren eine gleich 2, deren andere gleich 3 Kilogramm ist. Welchen Winkel machen diese Seitenkräfte mit der Richtung der Mittelkraft?

18c. Eine Kraft von 3,5 Kilogramm ist durch zwei Seitenkräfte zu

ersetzen, deren eine gleich 2,5 Kilogramm ist und einen Winkel von 45° mit der Richtung der Resultierenden macht; wie groß ist die andere Seitenkraft und welchen Winkel macht sie mit der Resultierenden?

Die **Berechnung** dieser Aufgaben mit Hülfe der Trigonometrie wird im Supplementband besprochen.

Flaschenzüge.

(Zu §. 17.)

19. Mit welcher Kraft muß an dem Seil bei *a* gezogen werden, um mit Hülfe des Flaschenzuges Fig. 11 auf Seite 29 eine Last von 5 Centnern zu heben?

20. Mit welcher Kraft muß an dem freien Seilende des Flaschenzuges Fig. 12 auf Seite 29 gezogen werden, um mit Hülfe desselben einen 7 Meter langen, 2 Decimeter breiten und 3 Decimeter hohen Balken von Tannenholz zu heben?

(Das specifische Gewicht des trocknen Tannenholzes findet man in der Tabelle auf Seite 10.)

Der Hebel.

(Zu §. 18.)

21. An einem mathematischen Hebel, Fig. 604, dessen Stützpunkt in C ist, sind in A und B die Gewichte P und Q angehängt. Wenn nun $P =$

Fig. 604.

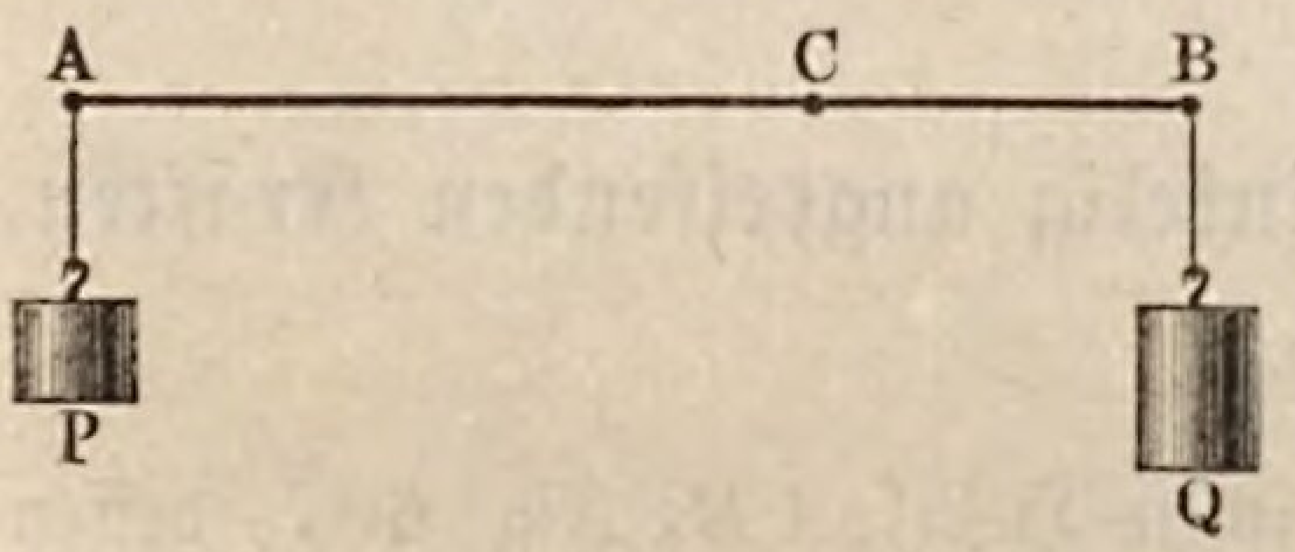
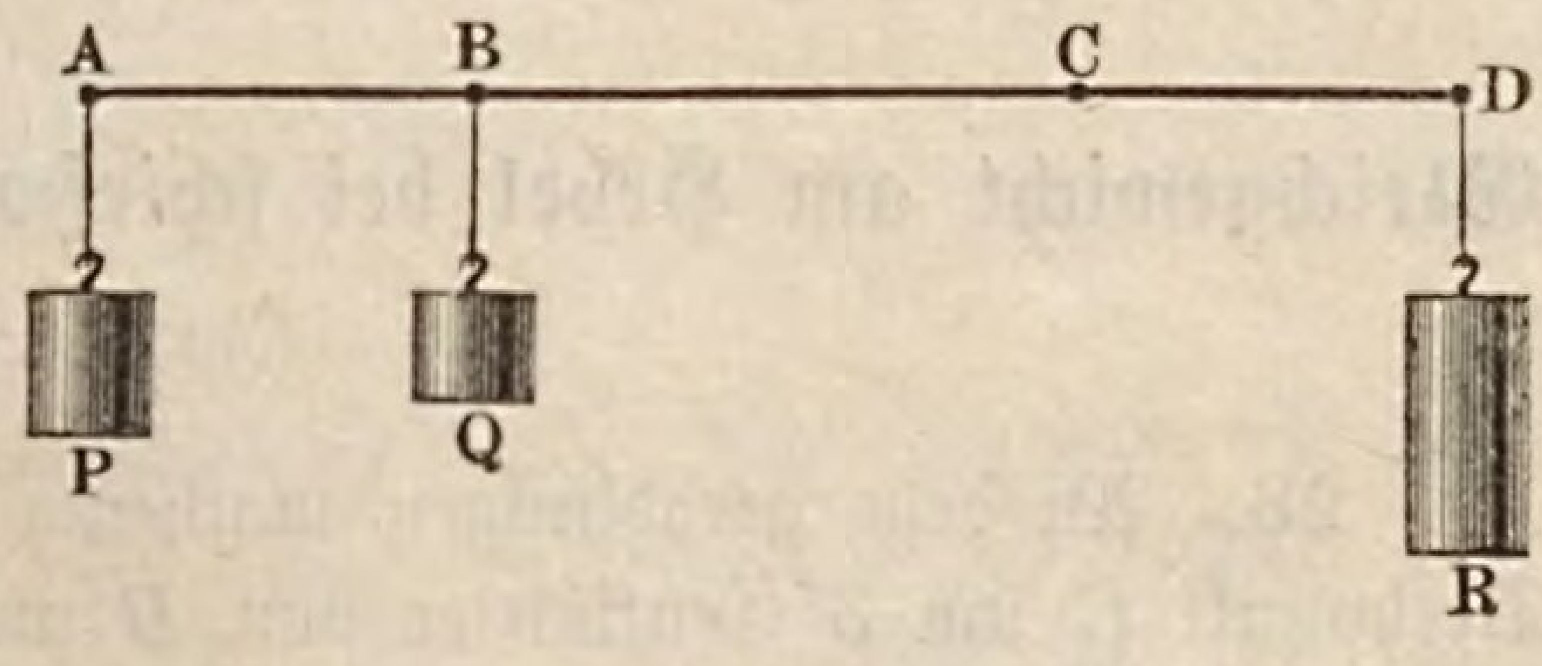


Fig. 605.



7 Kilogramm, $AC = 80$ und $BC = 40$ Centimeter ist, wie groß muß Q sein, wenn Gleichgewicht stattfinden soll?

22. Wie groß ist in dem eben betrachteten Falle das statische Moment einer jeden der beiden Kräfte?

23. Das, Fig. 604, an dem Hebelarm $AC = 53$ Centimeter angehängte Gewicht P sei 134 Gramm. Wie groß muß der Hebelarm BC sein, wenn für eine in B angehängte Last von 250 Gramm Gleichgewicht stattfinden soll?

24. An den Hebelarmen $AC = 18$ und $BC = 11$ Centimetern hängen links vom Unterstützungspunkt C (Fig. 605) eines mathematischen Hebels die Gewichte $P = 93$ und $Q = 64$ Gramm. Welches ist die Summe der statischen Momete dieser Kräfte und welches Gewicht R muß man auf der anderen

Seite von C am Hebelarm $CD = 7$ Centimeter anhängen, um ihnen das Gleichgewicht zu halten?

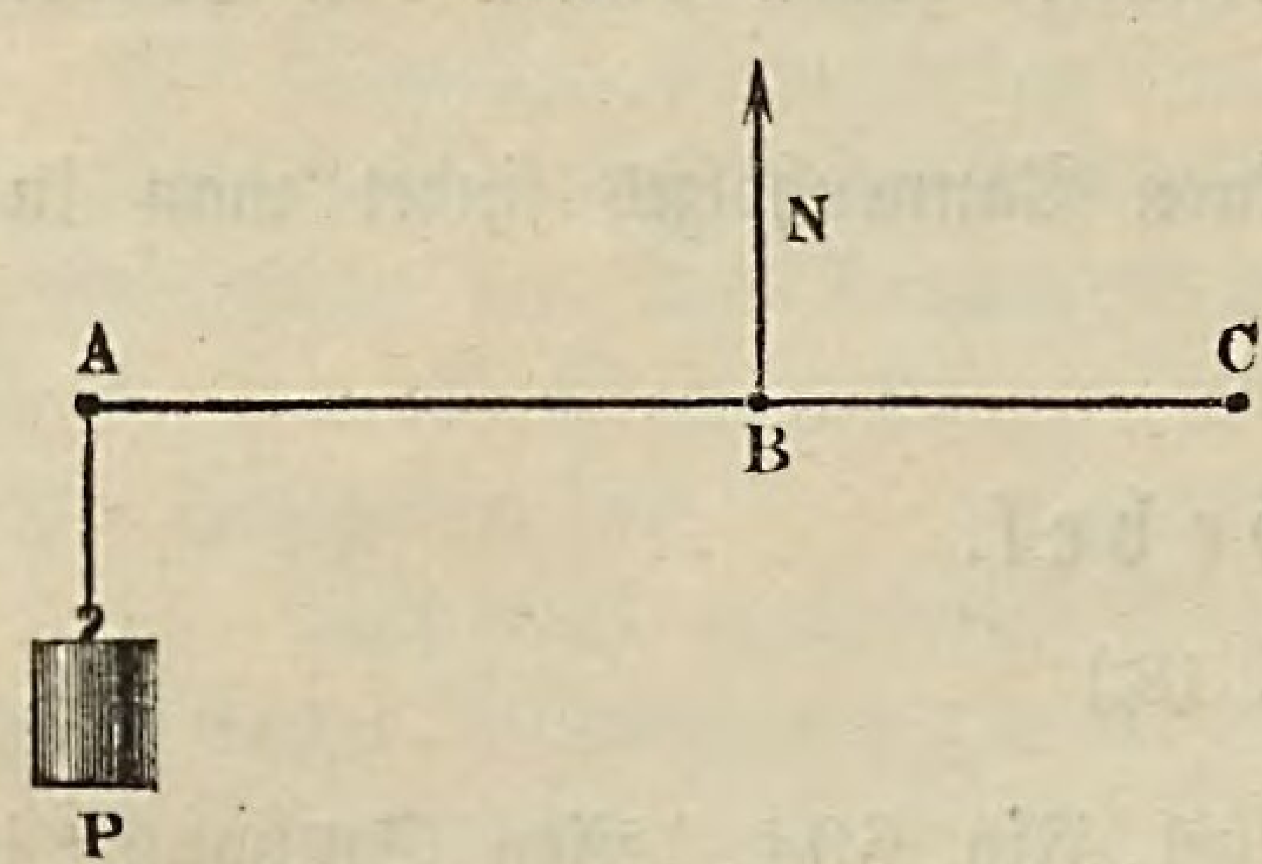
25. An der Pumpe Fig. 114 Seite 103 sei die Länge des Hebelarmes, an welchem die Kolbenstange angehängt ist, 20 Centimeter; der Hebelarm, an welchen die Hand des Arbeiters angreift, sei 100 Centimeter; mit welcher Kraft wird der Kolben gehoben, wenn der Arbeiter den Hebel mit einer Kraft von 12,5 Kilogramm niederdrückt?

Der einarmige Hebel.

(Zu §. 19.)

26. An dem einarmigen Hebel Fig. 606 ist in A ein Gewicht von 520 Gramm angehängt, während in B eine nach oben gerichtete Kraft N zieht. Wie groß muß für den Fall des Gleichgewichtes N sein, wenn $AC = 42$ Centimeter und $BC = 18$ Centimeter ist?

Fig. 606.



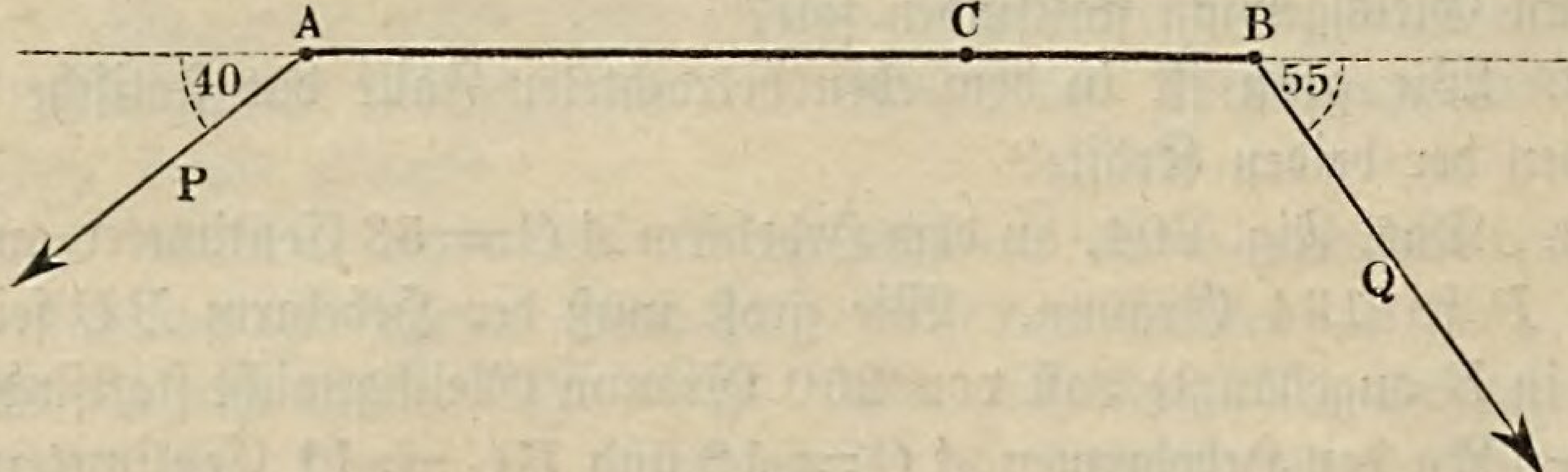
27. An der zur hydraulischen Presse gehörigen Druckpumpe, Fig. 64, Seite 69, drückt der Arbeiter den einarmigen Hebel bei l an einem Hebelarm von 9 Decimetern angreifend mit einer Kraft von 45 Pfund nieder. Mit welcher Kraft wird der Kolben s niedergedrückt, wenn derselbe an einem Hebelarm von 1,8 Decimetern angehängt ist?

Gleichgewicht am Hebel bei schiefwinkelig angreifenden Kräften.

(Zu §. 20.)

28. An dem geradlinigen mathematischen Hebel AB, Fig. 607, dessen Drehpunkt C um 3 Centimeter von B und um 7 Centimeter von A entfernt

Fig. 607.



ist, greift bei B eine Kraft Q von 5 Kilogramm an, deren Richtung mit der Richtung des Hebels einen Winkel von 55 Grad macht. Wie groß muß eine

bei A angreifende Kraft P sein, deren Richtung einen Winkel von 40^0 mit der Verlängerung des Hebels macht, wenn sie der Kraft Q das Gleichgewicht halten soll?

29. Wie groß ist für den eben betrachteten Fall das statische Moment einer jeden der beiden Kräfte P und Q?

30. Wenn Größe und Richtung der Kraft Q, sowie auch die Hebelarme AC und BC denselben Wert behalten wie im vorigen Beispiel, unter welchem Winkel muß dann eine Kraft $P = 2$ Kilogramm in A angreifen, wenn sie der Kraft Q das Gleichgewicht halten soll?

Haspel und Räderwerke.

(Zu §. 21.)

31. Die Länge des Kurbelarmes FC am Haspel Fig. 26 Seite 38 sei gleich 45 Centimeter, der Radius des Wellbaumes sei 10,5 Centimeter, welche Last kann mit Hülfe dieses Haspels gehoben werden, wenn an jeder der beiden an der Umdrehungsachse angebrachten Kurbeln ein Mann mit einer Kraft von 22,5 Kilogramm arbeitet?

32. Der Radius des Wellbaumes D an dem zusammengesetzten Haspel Fig. 28 Seite 40 sei 15 Centimeter, das Rad H habe 60, der in dasselbe eingreifende Trieb habe 12 Zähne; die Länge des Kurbelarms auf jeder Seite der Maschine betrage 36 Centimeter.

Wenn nun an jeder dieser Kurbeln ein Mann arbeitet, welchen Druck muß jeder der beiden Arbeiter anwenden, wenn eine Last von 500 Kilogramm gehoben werden soll?

Schiefe Ebene.

(Zu §. 22.)

33. Welches Verhältnis findet statt zwischen Kraft und Last auf einer schiefen Ebene, welche einen Winkel von 5^0 mit der Horizontalen macht?

34. Welches Verhältnis findet statt zwischen Kraft und Last auf einer schiefen Ebene, deren Steigung 5, 10, 15 Prozent beträgt (d. h. auf einer schiefen Ebene, welche bei einer Länge von 100 Fuß um 5, 10, 15 Fuß steigt)?

35. Wie viel Prozent beträgt die Steigung der schiefen Ebene Fig. 29 Seite 41, wenn man mit einem bei P angehängten Gewicht von 150 Gramm das Herabrollen eines 1000 Gramm schweren Körpers a verhindern kann? Welchen Winkel macht für diesen Fall die schiefe Ebene mit der Horizontalen?

36. Ein Pferd kann in gewöhnlichem Schritte gehend eine Zugkraft von ungefähr 75 Kilogramm ausüben und mit dieser auf einer horizontalen Chaussee eine auf einen Wagen geladene Last von 1000 Kilogramm fortziehen. Um auf diese Weise 2000 Kilogramm auf ebener Straße fortzuziehen, hätte man also zwei Pferde nötig. Wie viel Pferde Vorspann müßte man nehmen,

um diese Last auf einer Landstraße hinaufzuziehen, welche 3, 7, 12 Prozent Steigung hat?

37. Auf einer horizontalen Eisenbahn kann ein Pferd eine Last von 20000 Kilogramm fortziehen. Wie viel Pferde Vorspann sind nötig, um diese Last auf einer Eisenbahn in die Höhe zu ziehen, welche 3 Prozent Steigung hat?

Die Schraube.

(Zu §. 23.)

38. Der Radius der Spindel an der Schraubenwinde Fig. 34 auf Seite 44 sei 3 Centimeter, die Höhe eines Schraubenganges sei 1,5 Centimeter. Wie viel Prozent beträgt die Steigung der Schraube? Mit welcher am Umfang der Spindel angreifenden Kraft muß dieselbe gedreht werden, wenn eine auf *k* liegende Last von 150 Kilogramm gehoben werden soll? Welche Kraft müßte zur Hebung der gleichen Last bei *l* an einem Hebelarm von 33 Centimeter wirken?

39. Der Umfang der Spindel der Schraubenpresse Fig. 35 Seite 44 sei 30 Centimeter, die Höhe eines Schraubenganges sei 2 Centimeter. Mit welcher Kraft wird die Preßplatte *kk* niedergedrückt, wenn bei *l*, an einem Hebelarm von 5 Decimeter, ein Druck von 15 Kilogramm ausgeübt wird?

Der Keil.

(Zu §. 24.)

40. Der Widerstand, welchen der Holzklotz Fig. 36 Seite 45 einem Zerreißen längs der Richtung seiner Achse entgegensetzt, sei gleich dem Druck von 100 Kilogramm. Mit welcher Kraft muß man gegen den Rücken des Keils drücken, um das Holzstück zu zerreißen, wenn die Länge des Keils 24 Centimeter, die Breite des Rückens aber 6 Centimeter ist?

41. Der Keil einer Ölpresse ist 36 Centimeter lang und sein Rücken ist 9 Centimeter breit. Mit welcher Kraft wird der Ölkuchen zusammengepreßt, wenn gegen den Rücken des Keils eine Kraft von 50 Kilogramm wirkt?

Festigkeit.

(Zu §. 31.)

42. Welches ist das Minimum des Gewichtes, welches man an einen Stab von Kiefernholz, dessen Querschnitt 3 Quadratcentimeter beträgt, anhängen muß, um ihn zu zerreißen?

43. Welches ist die Grenze der Tragkraft eines runden eisernen Stabes von 1,2 Centimeter Durchmesser?

44. Wie dick muß ein Messingdraht sein, wenn 500 Kilogramm die Grenze seiner Tragkraft sein soll?

45. Welches ist die Grenze der Tragkraft für ein schmiedeeisernes Rohr, welches 5 Centimeter äußeren und 4 Centimeter inneren Halbmesser hat?

46. Ein Seil von 3 Centimeter Durchmesser riß ab, als man das angehängte Gewicht allmählich bis auf 4000 Kilogramm vermehrt hatte; welches wäre demnach der Festigkeitsmodulus k für dieses Seil?

47. Ein Balken von Eichenholz, 12 Centimeter breit, 20 Centimeter hoch, ist einerseits eingemauert und ragt aus der Mauer noch 1 Meter hervor. Welche Last Q müßte man mindestens an dem freien Ende anhängen, um den Balken abzubrechen?

48. Die Tabelle auf Seite 61 des Grundrisses giebt den Festigkeitsmodulus für Quadratmillimeter und Kilogramm. Wie groß ist der Festigkeitsmodulus der in jener Tabelle genannten Substanzen, wenn man den preußischen Quadratzoll (1 Zoll preuß. = 2,6 Centimeter) zur Flächeneinheit und das Pfund (zu 500 Gramm) zur Gewichtseinheit nimmt?

49. Ein 5 Zoll (preuß.) breiter, 10 Zoll hoher Balken von Kiefernholz ist an seinen beiden Enden eingemauert. Das zwischen beiden Mauern befindliche freie Stück des Balkens ist 17 Fuß lang. Welche Last müßte man mindestens auf der Mitte des Balkens auflegen, um ihn zu zerbrechen?

Die hydraulische Presse.

(Zu §. 34.)

50. An einer hydraulischen Presse sei der Durchmesser des Pumpenkolbens 3 Centimeter, also $r = 1{,}5$ Centimeter, der Durchmesser des Druckkolbens sei 36 Centimeter, also $R = 18$ Centimeter. Es sei ferner $l = 24$ Centimeter, $L = 108$ Centimeter. Mit welcher Kraft D muß der Arbeiter drücken, damit der Druck K, durch welchen der große Kolben gehoben wird, gleich 20 000 Kilogramm sei?

51. Wie groß ist für die eben angegebenen Dimensionen der hydraulischen Presse der Wert von K, wenn $D = 12{,}5$ Kilogramm ist?

52. Wie groß müßte bei übrigens unveränderten Dimensionen der hydraulischen Presse der Durchmesser des Pumpenkolbens sein, wenn der Arbeiter durch eine Kraft $D = 15$ Kilogramm einen Druck $K = 25\,000$ Kilogramm ausüben sollte?

Boden- und Seitendruck der Flüssigkeiten.

(Zu §§. 37 und 38.)

53. Der Boden eines Wasserständers hat 6 Quadratdecimeter Oberfläche und befindet sich 7 Decimeter unter dem Wasserspiegel, welchen Druck hat der Boden auszuhalten?

54. Ein Glasgefäß, dessen Boden 30 Quadratcentimeter beträgt, ist 27 Centimeter hoch mit Quecksilber gefüllt; welchen Druck hat der Boden auszuhalten?

55. In einer Röhrenleitung steht eine Wassersäule von 105 Meter Höhe; wie groß ist der Druck, den jeder Quadratcentimeter der Wandfläche am unteren Ende der Röhrenleitung auszuhalten hat?

56. Ein cylindrisches, mit Wasser gefülltes Gefäß hat 6 Decimeter Durchmesser. Wie groß ist der Gesamtdruck, den ein ringförmiges Stück der Gefäßwand auszuhalten hat, welches 1 Decimeter hoch ist und dessen obere Grenze 5 Decimeter unter dem Wasserspiegel liegt?

Gewichtsverlust untergetauchter Körper.

(Zu §. 40.)

57. Wie viel wird eine 6 Kilogramm schwere Kugel von Gußeisen noch wiegen, wenn dieselbe in Wasser getaucht ist?

58. Wie weit wird ein auf Wasser schwimmender Würfel aus trocknem Tannenholz noch aus dem Wasser hervorragen?

59. Mit welcher Kraft wird ein ganz in Wasser untergetauchtes Stück Kork aufwärts getrieben, welches in der Luft 73 Gramm wiegt?

60. Ein Stück mit gediegenem Silber durchwachsenen Schwerspaths wiegt 1500 Gramm. In Wasser eingetaucht, beträgt sein Gewichtsverlust 230 Gramm. Wie viel gediegen Silber ist in dem Stück enthalten?

61. Wie schwer wird eine in Wasser untergetauchte Kugel von 6 Centimeter Durchmesser wiegen, deren Masse 2 Gewichtsteile Blei auf zwei Gewichtsteile Zinn enthält?

NB. Die zur Lösung dieser Aufgaben nötigen specifischen Gewichte findet man in der Tabelle Seite 10.

Nicholson's Aräometer.

(Zu §. 42.)

62. Auf den Teller des Nicholson'schen Aräometers ist ein Stück Aluminium und außerdem so viel Schrot aufgelegt worden, daß das Instrument bis zur Marke einsinkt. Statt des Aluminiumstückes mußte man 6,85 Gramm auflegen, um ein gleiches Einsinken zu bewirken.

Nachdem jene 6,85 Gramm entfernt und das Aluminiumstück in das Sieb *C* gelegt worden war, mußte man auf den Teller noch 2,57 Gramme auflegen, um das Instrument wieder bis zur Marke einsinken zu machen. Wie groß ist das specifische Gewicht des Aluminiums?

Skalenaräometer.

(Zu §. 43.)

63. Ein für schwerere Flüssigkeiten bestimmtes Volumeter sinkt in drei verschiedenen Mischungen von Wasser und Schwefelsäure ein bis zu den Teil-

strichen 72, 85 und 93. Welches ist das specifische Gewicht dieser drei Mischungen?

64. Ein für leichtere Flüssigkeiten bestimmtes Volumeter sinkt in drei verschiedenen Mischungen von Wasser und Weingeist ein bis zu den Teilstrichen 108, 117 und 128. Welches ist das specifische Gewicht dieser Mischungen?

65. An welche Stelle der Volumeterskala fallen die Teilstriche der Densimeterskala, welche den specifischen Gewichten 0,78, 0,93, 1,14 und 1,68 entsprechen?

Kapillarerscheinungen.

(Zu §. 48.)

66. Wie hoch steigt das Wasser in einem gläsernen Haarröhrchen von 0,3 Millimeter Durchmesser?

67. Wie hoch steigt Alkohol (specifisches Gewicht 0,8135) in demselben Röhrchen?

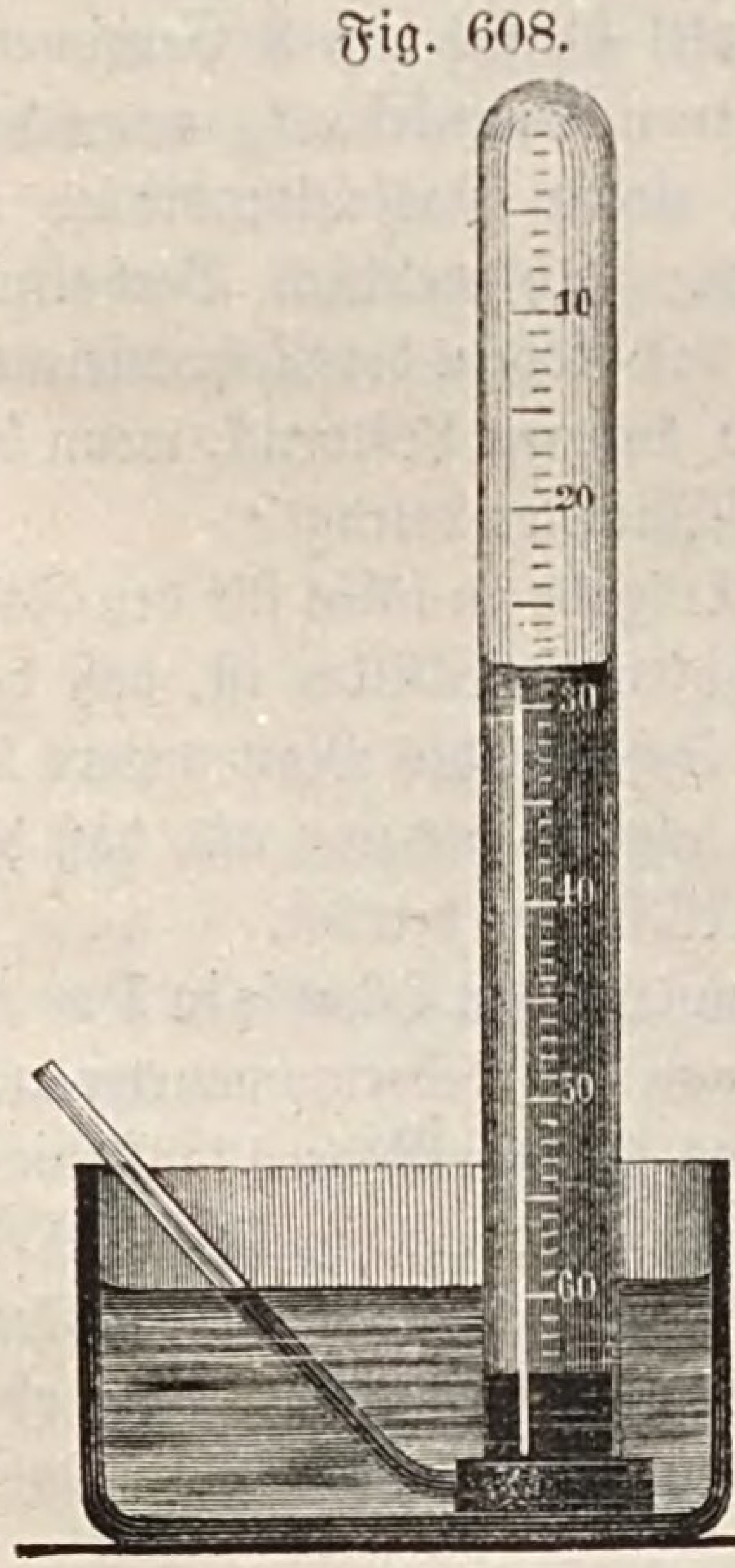
68. Wie groß muß der Durchmesser eines gläsernen Haarröhrchens sein, wenn Wasser in demselben 1,5 Decimeter hoch aufsteigen soll?

Das Mariotte'sche Gesetz.

(Zu §. 58.)

69. Eine gegebene Menge Leuchtgas nimmt beim normalen Barometerstande von 760 Millimeter ein Volumen von 524 Kubikmeter ein; wie groß wird das Volumen dieser Gasmenge sein, wenn der Barometerstand auf 740 Millimeter fällt? wie groß, wenn das Barometer auf 768 Millimeter steigt?

Fig. 608.



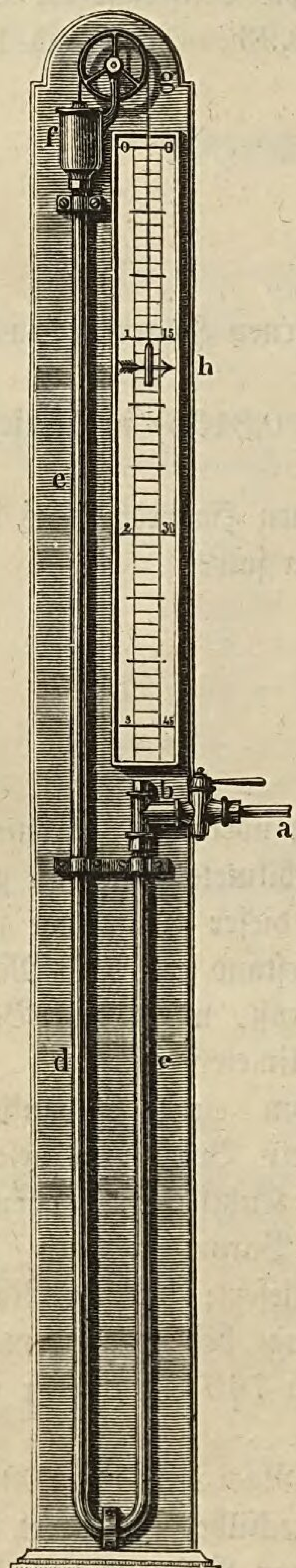
70. Der Strom einer galvanischen Säule hat, durch ein Voltameter geleitet, in drei Minuten 258 Kubikcentimeter Knallgas bei einem Barometerstande von 736 Millimeter geliefert; welchen Raum würde diese Gasmenge bei dem normalen Barometerstande von 760 Millimeter einnehmen?

71. In einem Glasrohre Fig. 608 befindet sich, durch Quecksilber abgesperrt, eine Gasmenge, welche das Volumen von 153 Kubikcentimetern einnimmt. Der Barometerstand beträgt gerade 742 Millimeter; der Gipfel der Quecksilbersäule im Rohre steht 85 Millimeter über dem Queck-

silberspiegel im Gefäß; wie groß würde das Volumen dieser Gasmenge unter einem Drucke von 760 Millimeter sein?

(Bezeichnen wir allgemein mit b den gerade stattfindenden Barometerstand, mit h die Höhe der Quecksilbersäule im Rohre, so ist der Druck, welchem das Gas im oberen Teile der Röhre ausgesetzt ist, offenbar $b - h$; im obigen Beispiele wäre also der Druck, welchem das Gas ausgesetzt ist, 742 — 85 = 657 Millimeter.)

Fig. 609.



72. In einem Gasometer sind 20 Liter Sauerstoffgas eingeschlossen und durch eine Wassersäule von 63 Centimeter Höhe komprimiert. Der Barometerstand ist gleich 735 Millimeter. Welches Volumen würde obige Gasmasse einnehmen, wenn sie nur dem normalen Barometerstande von 760 Millimeter ausgesetzt wäre? (Zunächst muß berechnet werden, wie hoch eine Quecksilbersäule sein muß, wenn sie einer Wassersäule von 63 Centimeter Höhe das Gleichgewicht halten soll.)

Messung des Druckes eingeschlossener Gase.

(Zu §. 63.)

73. Die Sperrungsflüssigkeit in dem offenen Manometer, Fig. 140, Seite 121, sei Wasser, dessen Niveau im Schenkel bc sich um 3 Centimeter tiefer stellt als im offenen Schenkel cd, wenn das Manometer bei a mit einem Gasleitungsrohre in Verbindung gesetzt wird. In welchem Verhältnis steht der Druck, welchen das Gas in der Röhrenleitung auszuhalten hat, zu dem äußeren Luftdruck, wenn der Barometerstand 745 Millimeter beträgt?

74. Die gleiche Aufgabe zu lösen für den Fall, daß die Sperrungsflüssigkeit Quecksilber ist, daß das Quecksilber im offenen Schenkel des Manometers 23 Millimeter höher steht als im anderen und daß der Barometerstand 753 Millimeter beträgt.

75. Um die Spannkraft der Dämpfe in Dampfkesseln zu messen, hat man die Hebermanometer auch in größerem Maßstab aus eisernen Röhren konstruiert, Fig. 609. Der kürzere Schenkel c ist durch das Rohr a mit dem Innern des Dampfkessels verbunden. Wie groß ist die Spannkraft des Dampfes im Kessel, wenn der Gipfel der Quecksilbersäule in dem oben offenen Schenkel def um 1,7 Meter höher steht als im Schenkel c?

76. Wie groß ist die Spannkraft des Dampfes in dem Dampfkessel, welcher mit dem Kompressionsmanometer Fig. 142 S. 121 in Verbindung gesetzt ist, wenn die Luft in dem 24 Centimeter langen Kompressionsrohre auf $^1/_2$, $^1/_4$, $^1/_6$ ihres ursprünglichen Volumens zusammengepreßt ist?

77. In welcher Höhe über dem Niveau des Quecksilbers im Gefäße *D*, Fig. 142 S. 121 müssen die Teilstriche 2, 4, 8 angebracht sein, wenn sie eine Spannkraft des Dampfes von 2, 4, 8 Atmosphären anzeigen sollen?

78. Die untere Fläche des Ventils, Fig. 143 S. 122, gegen welche der Dampf drückt, sei gleich 2 Quadratcentimetern; der Druck, welchen der unbelastete Hebel durch sein eigenes Gewicht auf das Ventil bei *D* ausübt, betrage 600 Gramm. Wie groß ist die Spannkraft des Dampfes für den Fall, daß das Abblasen eintritt, wenn ein Gewicht *P* von 800 Gramm so angehängt wird, daß der Hebelarm, an welchem es wirkt, 8 mal so groß ist als der Hebelarm *FD*.

Der Luftballon.

(Zu §. 64.)

79. Ein Ballon von Goldschlägerhaut hat 5 Kubikdecimeter Inhalt und wiegt 3 Gramm. Wie groß ist seine Steigkraft (der Auftrieb), wenn er mit Wasserstoffgas gefüllt ist?

NB. Das specifische Gewicht der atmosphärischen Luft und des Wasserstoffgases findet sich auf Seite 11.

80. Wie groß ist die Steigkraft eines mit Wasserstoffgas gefüllten Ballons von 500 Kubikmeter Inhalt, wenn das Gewicht der Hülle mit allem, was daran hängt, 450 Kilogramm beträgt?

81. Würde derselbe Ballon mit derselben Last noch steigen, wenn er mit Leuchtgas gefüllt wäre?

82. Wie groß ist die Steigkraft eines mit Leuchtgas gefüllten Ballons von 1000 Kubikmeter Inhalt, wenn die Hülle mit allem, was daran hängt, 250 Kilogramm wiegt?

Das Fallgesetz.

(Zu §§. 69 und 70.)

83. Eine Kugel rollt auf einer schiefen Ebene herab, welche so geneigt ist, daß die Endgeschwindigkeit der ersten Sekunde 8 Decimeter beträgt. Welches ist nun

1) die Geschwindigkeit am Ende der zweiten, dritten, vierten und fünften Sekunde?

2) wie weit rollt die Kugel in 1, 2, 3, 4, 5 Sekunden herab?

3) welchen Raum durchläuft sie in der zweiten, dritten, vierten und fünften Sekunde?

83 a. Wie groß ist beim freien Fall der in $^1/_{10}$, $^2/_{10}$ . . . . $^9/_{10}$ Sekunden durchlaufene Raum in Metermaß gemessen?

83b. Um die Tiefe eines Brunnens zu ermitteln, hat man einen Stein hinabfallen lassen, und von dem Moment, wo man ihn losließ, bis zu dem Moment, in welchem man ihn ins Wasser fallen hörte, $3\frac{1}{2}$ Sekunden gezählt; wie tief ist der Brunnen (ohne den Luftwiderstand und die Fortpflanzungsdauer des Schalls zu berücksichtigen)?

84. Wie viel Zeit würde ein Körper nötig haben, um eine Höhe von 1000 Meter (ohne Luftwiderstand) zu durchfallen?

85. Mit welcher Geschwindigkeit kommt eine Bleikugel auf dem Boden an, welche 10, 20, 100 Meter hoch herabgefallen ist?

Gleichförmig verzögerte Bewegung.

(Zu §. 71.)

86. Wenn ein schwerer Körper mit einer Geschwindigkeit von 10, 50, 100, 200 Meter vertikal in die Höhe geworfen wird, so ist die Frage, in wie viel Sekunden er den Gipfel seiner Bahn erreichen und wie hoch er steigen wird?

Centralbewegung und Schwungkraft.

(Zu §§. 73 und 74.)

87. Wie groß ist die Beschleunigung des Mondes gegen die Erde?

88. Welchen Weg würde der Mond in der ersten Sekunde zurücklegen, wenn er auf die Erde herabfiele?

Um diese beiden Aufgaben (nach Gleichung 1 Seite 142), auflösen zu können, sind noch folgende Zahlenangaben nötig: Die Umlaufszeit t des Mondes beträgt 27 Tage 7 Stunden 43 Minuten oder 2 335 380 Sekunden. Der Umfang der Erde beträgt 40 000 000 Meter; da aber der Radius der Mondbahn 60 mal so groß ist als der Erdhalbmesser, so ist der Umfang der Mondbahn $40\,000\,000 \times 60$ Meter.

89. Eine Bleikugel von 20 Gramm Gewicht, wird an einem 90 Centimeter langen Faden so im Kreise herumgeschwungen, daß sie zu jeder Umdrehung $\frac{1}{2}$ Sekunde Zeit bedarf. Wie groß ist ihre Centrifugalkraft (nach der Gleichung in §. 74 Seite 143)?

90. Wie groß ist die Centrifugalbeschleunigung eines Punktes am Umfange eines Schwungrades, welches einen Halbmesser von 2 Meter hat und welches vier Umdrehungen in 3 Sekunden macht?

91. Wie groß ist die Beschleunigung der Schwungkraft für einen auf dem Erdäquator befindlichen Punkt infolge der täglichen Umdrehung der Erde?

92. Wie schnell müßte sich die Erde um ihre Achse drehen, wenn am Äquator die Centrifugalkraft der Schwerkraft gleich sein sollte?

Die Pendelgesetze.

(Zu §. 75.)

93. Borda fand, daß ein einfaches Pendel, dessen Länge 389,6 Centimeter betrug, in Paris 1818 Schwingungen in der Stunde machte. Wie groß ergiebt sich nach diesem Versuch der Wert der Beschleunigung g des freien Falles in Metern ausgedrückt (Gleichung 1) S. 149)?

94. Wie groß ist dem Borda'schen Versuch zufolge die Länge des Sekundenpendels?

95. Wie groß ist die Schwingungsdauer eines 20 Meter langen einfachen Pendels?

96. Wie viel Meter lang muß den in §. 75 S. 149 angegebenen Zahlen zufolge ein einfaches Pendel sein, wenn seine Schwingungsdauer 5 Sekunden betragen soll?

97. Wie lang ist ein einfaches Pendel, welches halbe Sekunden schlägt?

98. Ein im Schiff der Universitätskirche zu Freiburg aufgehängtes Foucault'sches Pendel macht 14 Schwingungen in der Minute; wie lang ist dasselbe?

99. Auf der Oberfläche des Mondes ist der Fallraum in der ersten Sekunde gleich 77 Centimeter, auf dem Jupiter beträgt er 12,5 Meter; wie groß würde die Schwingungsdauer des Pariser Sekundenpendels (Aufgabe 94) auf dem Mond und auf dem Jupiter sein?

Lebendige Kraft.

(Zu §. 80.)

100. Eine 6 Kilogramm schwere Kanonenkugel verläßt das Rohr mit einer Geschwindigkeit von 350 Meter; wie groß ist ihre lebendige Kraft?

101. Wie groß ist die lebendige Kraft eines 125 Gramm schweren Hammers, welcher mit einer Geschwindigkeit von 8 Meter auf den Kopf des Nagels aufschlägt?

102. Wie groß ist der Widerstand des Holzes, wenn der Nagel in sechs Schlägen 3 Meter tief eindringt?

103. Wie tief dringt der Nagel mit einem Schlage ein, wenn der Widerstand des Holzes einem Druck von 26 Kilogramm gleichgesetzt werden kann?

104. Wie groß ist (in Meterkilogrammen ausgedrückt) die lebendige Kraft, mit welcher ein Gewicht von 50 Kilogramm auf den Boden aufschlägt, wenn es 7 Meter hoch frei herabgefallen ist?

105. Nehmen wir an, das Gewicht von 50 Kilogramm sei an einem um eine Welle geschlungenen Seile befestigt, so daß durch das Niedersinken des Gewichtes die Welle umgedreht wird. Der Umdrehung der Welle wirkt aber irgend ein Widerstand, etwa Reibung, entgegen, weshalb der Fall des Gewichtes verzögert wird. Wenn nun das Gewicht, nachdem es 7 Meter herabgesunken

ist, eine Geschwindigkeit von 5 Metern erlangt hat, wie groß ist die lebendige Kraft, die es noch besitzt?

106. Da nun aber das unter den angegebenen Verhältnissen 7 Meter hoch herabgefallene Gewicht nicht die volle lebendige Kraft besitzt, welche einer Fallhöhe von 7 Metern entspricht (Aufgabe 104), wie viel lebendige Kraft hat es verloren, wie groß ist also die mechanische Arbeit, welche das Gewicht durch Umdrehung der Welle geleistet hat?

Ausflußgeschwindigkeit.

(Zu §. 83.)

107. Wie groß ist die Ausflußgeschwindigkeit, wenn die Druckhöhe der Reihe nach gleich ist 0,1 Meter, 0,5 Meter, 1,6 Meter?

108. Wie groß muß die Druckhöhe S sein, um eine Ausflußgeschwindigkeit $v = 0{,}3$ Meter, $v = 1{,}2$ Meter, $v = 7{,}6$ Meter zu erhalten?

Ausflußmenge.

(Zu §. 85.)

109. Wie groß ist (nach der letzten Gleichung auf S. 167) die Ausflußmenge Q für folgende zusammengehörige Werte des Durchmessers d der Öffnung und der Druckhöhe s?

$d = 0{,}02$ Meter und $s = 0{,}3$ Meter
$d = 0{,}02$ „ „ $s = 1{,}0$ „
$d = 0{,}04$ „ „ $s = 7{,}0$ „

Ausströmen der Gase.

(Zu §. 95.)

110. Wie groß ist die Ausströmungsgeschwindigkeit für atmosphärische Luft unter dem Drucke einer Wassersäule von 0,2 Metern Höhe, wenn der Barometerstand 760 Millimeter beträgt.

111. Wie groß ist unter dem gleichen Druck die Ausflußgeschwindigkeit der Kohlensäure und des Wasserstoffgases?

Zweites Buch.

A k u st i k.

Geschwindigkeit des Schalls.

(Zu §. 104.)

112. Zwischen der Wahrnehmung des Feuers und des Knalles einer abgefeuerten Kanone vergehen $7^1/_2$ Sekunden; wie weit ist die Kanone entfernt?

113. Zwischen der Wahrnehmung von Blitz und Donner vergehen 25 Sekunden; wie weit ist das Gewitter entfernt?

114. Einem Beobachter in A (Fig. 610) erscheint die von einem Blitz-

Fig. 610.

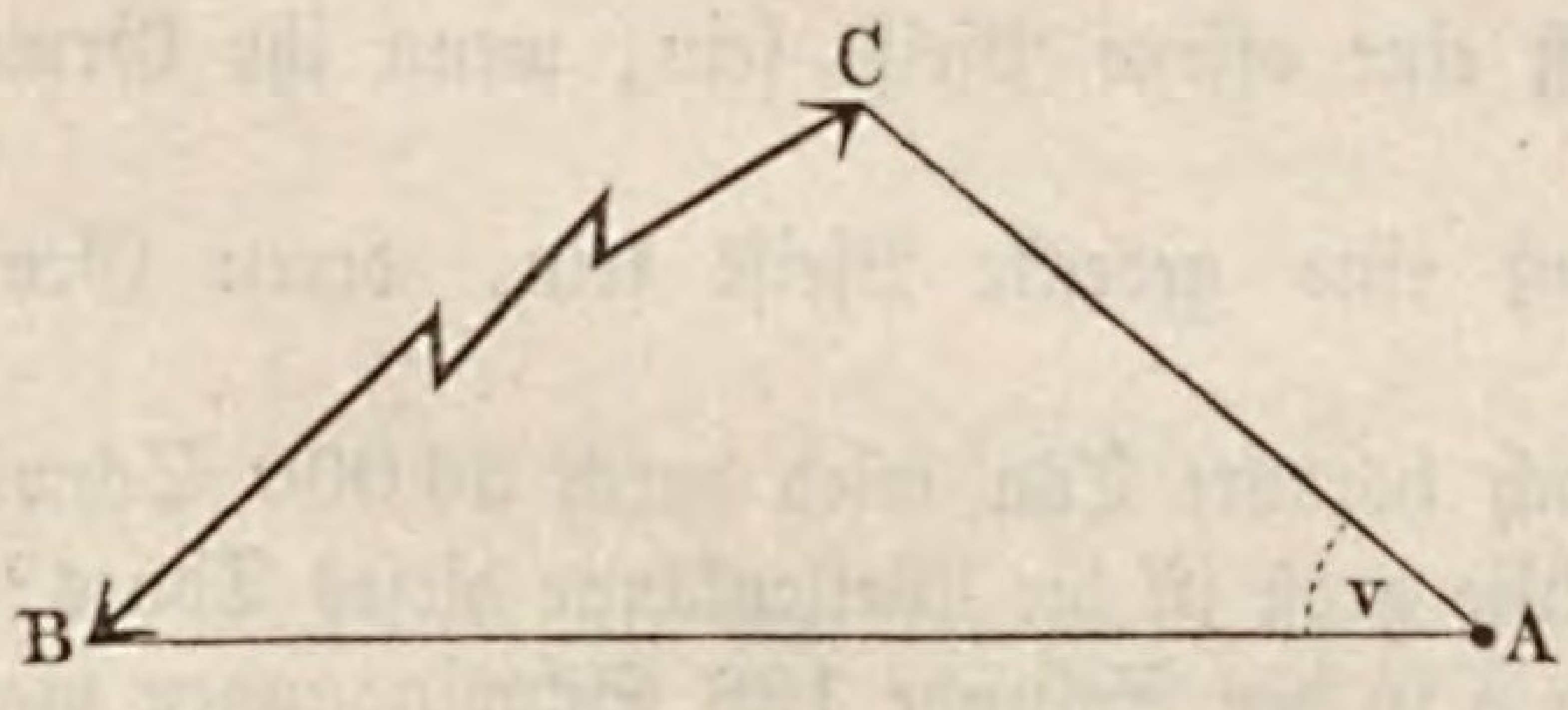
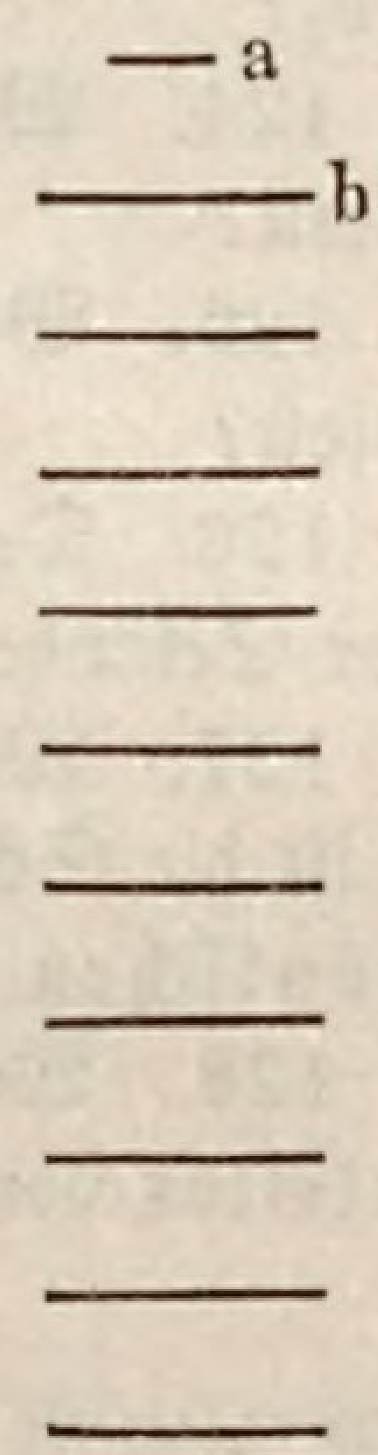


Fig. 611.



strahl durchlaufene Strecke CB unter einem Winkel von 30^0; 10 Sekunden nach der Wahrnehmung des Blitzes beginnt das Rollen des Donners, welches 7 Sekunden lang anhält; wie groß ist die Länge BC des Blitzes?

115. Man läßt einen Stein in einen 222,6 Meter tiefen Schacht hinabfallen; welche Zeit vergeht zwischen dem Augenblick, in welchem man den Stein losläßt, und dem Moment, in welchem man ihn auffallen hört.

116. Zwischen dem Augenblick, in welchem man einen Stein losläßt, und demjenigen, in welchem man ihn auf den Boden eines Schachtes aufschlagen hört, vergehen $5^1/_2$ Sekunden; wie tief ist der Schacht?

117. Ein Regiment ist in Kolonnen aufgestellt, wie Fig. 611 andeutet. Der Zwischenraum zwischen je zwei auf einander folgenden Kolonnen beträgt 5 Meter. Wenn nun in einem bestimmten Moment die Tamboure bei a zu schlagen beginnen und jede Kolonne in demselben Augenblick mit dem linken Fuß antritt, in welchem sie den ersten Trommelschlag hört, so müssen offenbar die hinteren Reihen später antreten als die vorderen. Es ist nun die Frage: die wievielste Kolonne beginnt den ersten Schritt in demselben Moment in

welchem die Mannschaft der ersten Reihe *b* den ersten Schritt vollendet hat, also den linken Fuß zum erstenmal wieder aufsetzt, vorausgesetzt, daß die Schrittdauer $^1/_2$ Sekunde beträgt?

Wellenlänge und Schwingungszahl der Töne.

(Zu den §§. 106 bis 110.)

118. Wie groß ist die Wellenlänge des Grundtons einer gedeckten Pfeife von 20 Centimeter Länge?

119. Wie groß ist die Schwingungszahl dieses Tones ($n = 341$ Meter)?

120. Wie groß ist die Wellenlänge des Grundtons einer offenen 50 Centimeter langen Röhre?

121. Wie groß ist die Schwingungszahl dieses Tones?

122. Welches ist die musikalische Bezeichnung dieses Tones, wenn das Stimmgabel-a, also a_1, 427 Schwingungen in der Sekunde macht?

123. Wie groß ist danach die Schwingungszahl der Töne c_1, e_1, g_1 und c_2?

124. Wie lang muß eine offene Pfeife sein, wenn ihr Grundton a_1 sein soll?

125. Wie lang muß eine gedeckte Pfeife sein, deren Grundton C sein soll?

126. Der höchste noch hörbare Ton wird durch 36 000 Schwingungen in der Sekunde erzeugt. Wie groß ist die Wellenlänge dieses Tones?

127. Wenn der Ton c in der Sekunde 128 Schwingungen macht, welches ist die Schwingungszahl für die reinen Töne d, e, f, g, a, h und c_1 der diatonischen Tonleiter?

128. Welches ist die Schwingungszahl der 12 Töne der chromatischen Tonleiter von c bis c_1 für gleichschwebende Temperatur?

Töne gespannter Saiten.

(Zu §. 112.)

129. Eine Stahlsaite von 1 Meter Länge ist so gespannt, daß sie den Ton c giebt; wie lang müßte dieselbe Saite bei unveränderter Spannung sein, um die Töne d, e, f, g, a, h und c_1 zu geben?

130. Eine Stahlsaite giebt durch eine Kraft von 4 Kilogramm gespannt den Ton c; durch welche Kräfte müßte man diese Saite bei unveränderter Länge spannen, wenn sie die Töne d, e, f, g, a, h und c_1 geben sollte?

131. Eine Stahlsaite von 1,2 Millimeter Durchmesser ist so gespannt, daß sie den Ton c giebt; wie dick müßte die Saite sein, um bei gleicher Länge und gleicher Spannung die große Terz, die Quinte und die Oktave von c zu geben?

Vibrierende Streifen und Stäbe.

(Zu §. 113.)

132. Ein Stahlstab von der Form Fig. 224, Seite 218, welcher 15 Centimeter lang und 7 Millimeter dick ist, giebt den Ton gis_2. Es wird nun gefragt:

a. wie dick müßte ein Stahlstab bei gleicher Länge sein, wenn er die große Terz, die Quinte und die Oktave von gis_2 geben sollte?

b. wie lang müßte man einen 7 Millimeter dicken Stab machen, wenn er die oben genannten Töne geben soll?

133. Die Stimmgabel gehört auch in die Kategorie vibrierender Stäbe und annähernd kann man jeden Schenkel als einen an dem einen Ende festgeklemmten Stab betrachten. Welchen Einfluß hat es nun auf die Tonhöhe, wenn man die Schenkel der Stimmgabel verkürzt?

134. Welchen Einfluß hat es auf die Tonhöhe einer Stimmgabel, wenn man ihre Schenkel durch Abfeilen der einander zugekehrten Flächen dünner macht?

Drittes Buch.

O p t i k.

P h o t o m e t r i e.

(Zu §. 126.)

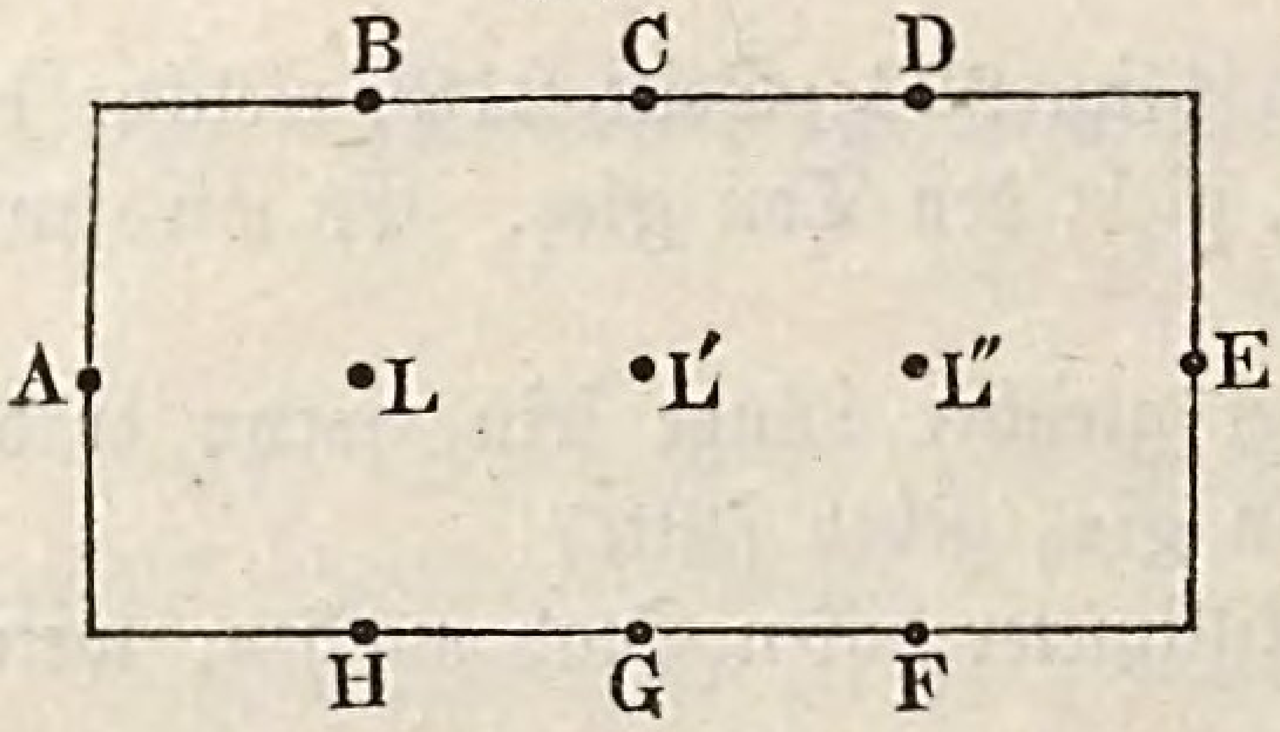
135. Bei unveränderter Erleuchtung von der Rückseite muß man auf der Vorderseite des Bunsen'schen Photometers die Normalkerze in einer Entfernung von 54 Centimeter, eine Argand'sche Lampe aber in einer Entfernung von 210 Centimeter von dem Papierschirm aufstellen, damit der Fettfleck unsichtbar wird. Wie groß ist die Leuchtkraft der Argand'schen Lampe?

136. Eine Wachskerze giebt bei 0,9 Meter Entfernung eine ebenso starke Erleuchtung wie eine Gasflamme in 2,7 Meter Entfernung. Die Wachskerze kostet 6 Pfennig, die Gasflamme 8 Pfennig per Stunde. Wie viel Wachskerzen müßte man anwenden, um eine der Gasflamme gleiche Lichtstärke zu erhalten und wie vielmal teurer würde die Erleuchtung durch Wachskerzen sein?

137. In einem Saale von 6 Meter Breite und 12 Meter Länge sind drei Argand'sche Lampen auf der Längsachse des Saales bei L, L' und L'', Fig. 612 (a. f. S.), so angebracht, daß der Abstand AL sowohl wie der Abstand EL'', $L'L''$ und $L'L$ gleich 3 Meter ist. Nimmt man nun die Erleuchtung,

welche eine Argand'sche Lampe in drei Meter Entfernung hervorbringt, zur Einheit, wie groß ist alsdann die durch die drei Lampen in den Punkten A, B, C, D u. s. w. hervorgebrachte Erleuchtung?

Fig. 612.



138. Wie groß würde die Erleuchtung in diesen Punkten sein, wenn man die drei Lampen in der Mitte des Saales bei L' vereinigte?

139. Um das Verhältnis des Brennwertes von Öl und Petroleum zu ermitteln, wurden folgende Versuche angestellt:

1) Um den Ölfleck des Bunsen'schen Photometers, hinter dessen Schirm eine Gasflamme von unveränderter Größe in unveränderter Entfernung aufgestellt war, verschwinden zu machen, mußte man vor dem Schirm eine Petroleumlampe in einem Abstande von 2,25, eine Öllampe aber in einer Entfernung von 2,61 Meter aufstellen.

2) Vor dem Versuch betrug das Gewicht der Petroleumlampe 1815, das der Öllampe 1641 Gramm. Nachdem beide Lampen 1 Stunde 50 Minuten gebrannt hatten, wog die Petroleumlampe noch 1780, die Öllampe noch 1590 Gramm.

3) Das specifische Gewicht des Petroleums war 0,805, das des Öls aber 0,905.

4) Das Liter Öl kostet 80, das Liter Petroleum kostet 30 Pfennige.

Es wird nun gefragt:

a. Wie verhält sich die Leuchtkraft der zu obigem Versuch gebrauchten Petroleumlampe zu der der Öllampe?
b. Wie viel Petroleum hat in der angegebenen Zeit die Petroleumlampe und wie viel Öl hat die Öllampe konsumiert?
c. Was kosten die konsumierten Quantitäten Petroleum und Öl?
d. Für wie viel Pfennig Petroleum hätte auf einer Petroleumlampe in der gegebenen Zeit verbrannt werden müssen, um gleiche Helligkeit mit der Öllampe zu erzielen?
e. In welchem Verhältnisse stehen demnach bei gleicher Lichtstärke die Unterhaltungskosten einer Öl- und einer Petroleumlampe?

Ebene Spiegel.

(Zu den §§. 127 und 128.)

140. Die Skala mn, Fig. 256, Seite 250, eines Poggendorff'schen Spiegelapparates sei in Millimeter geteilt, der Abstand des Maßstabes von der Mitte des Spiegels, also ao, sei zwei Meter. Wie groß ist der Winkel, um welchen der Spiegel aus seiner Mittellage gedreht ist, wenn das Bild des Teilstrichs 1 (d. h. eines von dem Punkt o um 1 Millimeter abstehenden Teilstrichs) am Fadenkreuz des Fernrohres erscheint, oder mit anderen Worten, wie groß ist v, wenn $n = 1$ Millimeter?

141. Zwei ebene Spiegel machen einen Winkel von 45 Grad mit einander. Es sind die Bilder eines zwischen diesen Winkelspiegeln befindlichen leuchtenden Punktes zu konstruieren. (Die Zeichnung ist in dem doppelten Maßstab der Fig. 257 Seite 251 auszuführen.)

Hohlspiegel.

(Zu den §§. 130 und 131.)

142. Die Brennweite eines Hohlspiegels sei 27 Centimeter, wie groß ist sein Krümmungshalbmesser? Der Krümmungshalbmesser eines Hohlspiegels beträgt 8 Centimeter, die Lage seines Brennpunktes soll durch Konstruktion gefunden werden (vergleiche Fig. 261 auf Seite 253).

143. Auf der Achse eines Hohlspiegels von 8 Centimeter Krümmungshalbmesser befindet sich ein leuchtender Punkt A (vergleiche Fig. 264 auf Seite 255), welcher 12 Centimeter von dem Krümmungsmittelpunkt C des Hohlspiegels (also 20 Centimeter von der Mitte d des Spiegels) entfernt ist. Wie weit liegt das Bild a des Punktes A von C entfernt? Diese Aufgabe ist durch Konstruktion zu lösen.

144. Dieselbe Aufgabe zu lösen für den Fall, daß der Abstand des Punktes A von der Mitte d des Spiegels 30, und für den Fall, daß dieser Abstand 12 Centimeter beträgt.

145. Auf der Achse desselben Hohlspiegels liegt ein leuchtender Punkt 6 Centimeter weit von d entfernt, wie groß ist die Entfernung seines Bildes von d?

Auch diese Aufgabe ist durch Konstruktion zu lösen.

146. Ein leuchtender Punkt A (vergleiche Fig. 265 Seite 255) liege auf der Achse eines Hohlspiegels von 4 Centimeter Brennweite 3 Centimeter von der Mitte d des Spiegels entfernt; durch Rechnung und Konstruktion den Punkt a zu finden, von welchem die von A ausgehenden Strahlen nach der Reflexion durch den Hohlspiegel divergieren.

147. Ein Pfeil von 1 Centimeter Höhe befindet sich 65 Millimeter weit von der Mitte eines Hohlspiegels von 4 Centimeter Brennweite und zwar so, daß die Hälfte seiner Länge über, die Hälfte unter der Achse des Hohlspiegels liegt. Das Bild dieses Pfeiles soll konstruiert werden (vergleiche Fig. 267). Wie hoch ist das Bild?

148. Dieselbe Aufgabe zu lösen für den Fall, daß ein 24 Millimeter hoher Pfeil 18 Centimeter weit von der Mitte des Spiegels entfernt ist.

149. Ein Pfeil von 1 Centimeter Höhe liegt 2 Centimeter weit vor der Mitte eines Hohlspiegels von 4 Centimeter Brennweite. Das Bild des Pfeils soll konstruiert werden (vergleiche Fig. 269, Seite 259).

149 a. Die Brennweite eines Hohlspiegels beträgt 10 Centimeter. Welches ist die Bildweite für $g = 10\,000$ Centimeter, $g = 1000$ Centimeter, $g = 100$ Centimeter, $g = 50$ Centimeter, $g = 30$ Centimeter, $g = 20$ Centi-

meter, $g = 15$ Centimeter, $g = 11{,}1$ Centimeter, $g = 8$ Centimeter, $g =$ 6 Centimeter, $g = 5$ Centimeter.

Die Aufgaben 143 bis 149 können sowohl durch Zeichnung als auch durch Rechnung gelöst werden, die Aufgabe 149a. ist nur durch Rechnung zu lösen und das Resultat tabellarisch zusammenzustellen.

Konvexspiegel.

(Zu §. 132.)

150. Der Krümmungshalbmesser eines Konvexspiegels beträgt 8 Centimeter. Die Lage seines Hauptzerstreuungspunktes soll durch Konstruktion bestimmt werden (vergleiche Fig. 270).

151. Ein Pfeil von 24 Millimeter Höhe liegt 4 Centimeter weit von der Mitte dieses Spiegels entfernt (vergleiche Fig. 271); das Bild des Pfeils soll konstruiert werden. Wie hoch ist das Bild?

Das Brechungsgesetz.

(Zu §. 134.)

152. Wenn ein Lichtstrahl so auf eine ebene Wasseroberfläche fällt, daß er einen Winkel von 60^0 mit dem Einfallslot macht, so wird er nach dem Übergange in Wasser einen Winkel von $40^0\,14'$ mit dem Einfallslot machen. Wie groß ist demnach der Brechungsexponent für den Übergang eines Lichtstrahles aus Luft in Wasser?

153. Für den Übergang aus Luft in Glas hat man als zusammengehörige Werte des Einfalls- und des Brechungswinkels gefunden $i = 60^0$ und $r = 34^0\,28'$. Wie groß ist demnach der Brechungsexponent des Glases?

154. Wie groß müssen beim Übergang eines Lichtstrahles aus Luft in Wasser die Einfallswinkel sein, wenn die zugehörigen Brechungswinkel 10, 20, 30 und 40^0 sein sollen?

155. Wie groß sind beim Übergang aus Luft in Wasser die Brechungswinkel, welche den Einfallswinkeln 10, 20, 30 u. s. w. bis 90^0 entsprechen?

156. Ein Lichtstrahl fällt so auf eine ebene Glasfläche, daß der Einfallswinkel $i = 42^0$ ist; wie groß ist der zugehörige Brechungswinkel?

157. Wie groß ist beim Übergang aus Luft in Glas der Wert des Brechungswinkels r, welcher den Einfallswinkeln i gleich 5, 15, 25 u. s. w. bis 85^0 entspricht?

NB. Die Aufgaben 154 bis 157 können sowohl durch Rechnung als auch durch Konstruktion gelöst werden. Im ersteren Falle nehme man für den Brechungsexponenten aus Luft in Wasser $n = 1{,}34$ und für den Brechungsexponenten aus Luft in Glas $n = 1{,}53$. Wenn man aber die Aufgaben durch Konstruktion lösen will, so kann man die angenäherten Brechungsexponenten $n = 1{,}33 = {}^4/_3$ und $n = 1{,}5 = {}^3/_2$ in Anwendung bringen.

158. Wie groß ist für Wasser, Alkohol, Benzol, Crownglas, Flintglas, Schwefelkohlenstoff und Diamant der Wert des Grenzwinkels?

Die Brechungsexponenten dieser Substanzen finden sich in §. 134 des Grundrisses.

159. Wie groß ist der Brechungsexponent für den Übergang eines Lichtstrahles aus Wasser in Benzol?

160. Wie groß ist der Brechungsexponent für den Übergang eines Lichtstrahles aus Wasser in Schwefelkohlenstoff?

161. Wie groß ist der Wert des Grenzwinkels für den Übergang eines Lichtstrahles aus Wasser in Benzol?

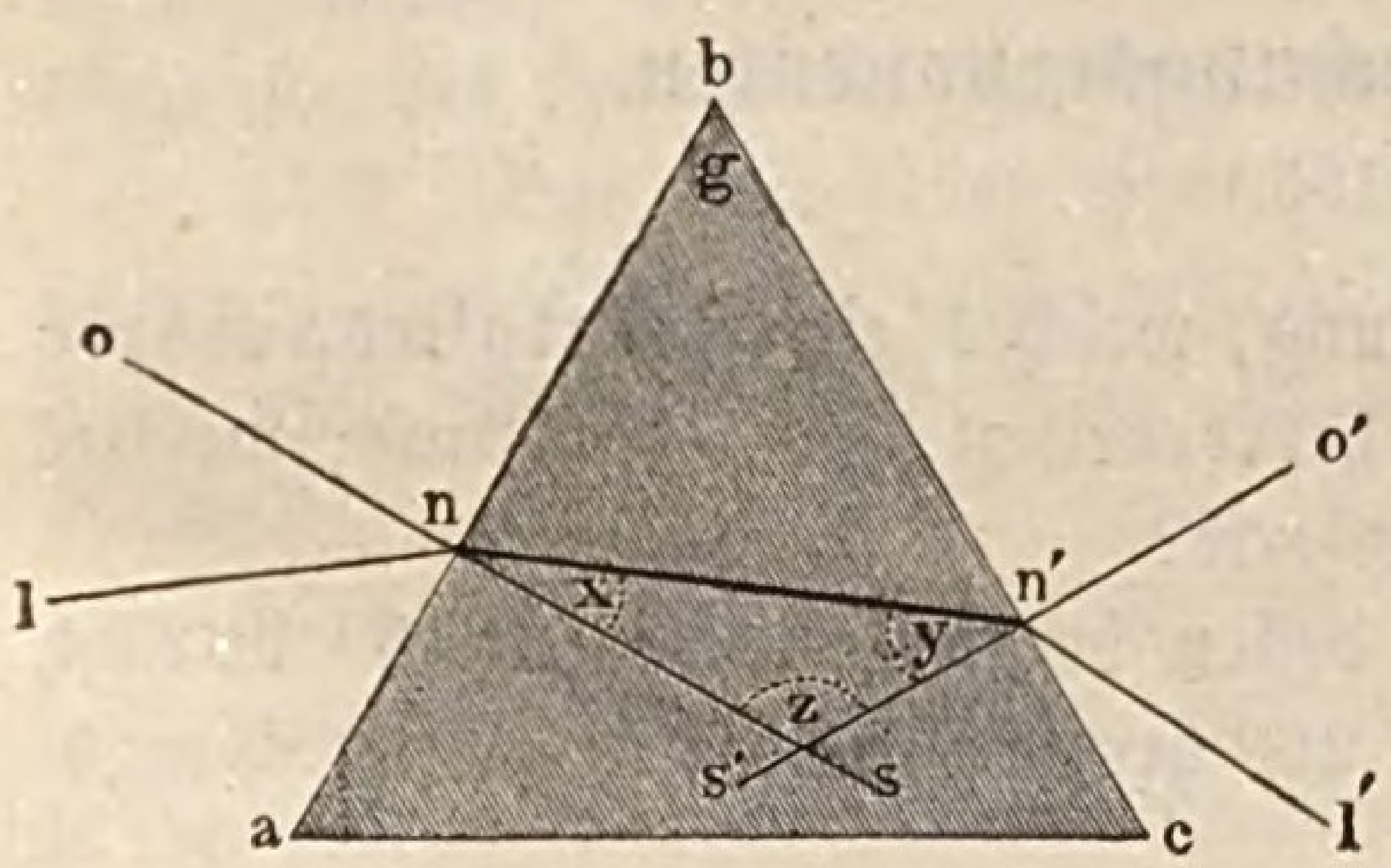
162. Wie groß ist der Grenzwinkel für den Übergang eines Lichtstrahles aus Wasser in Schwefelkohlenstoff?

Ablenkung der Lichtstrahlen durch Prismen.

(Zu §. 135.)

163. Der brechende Winkel g des Glasprismas Fig. 613 sei 60°. Ein Strahl ln treffe die vordere Fläche ab so, daß der Einfallswinkel $i = lno$ gleich 52° ist. Durch Konstruktion die Richtung des gebrochenen Strahls nn' und des austretenden Strahls $n'l'$ zu finden unter der Voraussetzung, daß der Brechungsexponent der Prismensubstanz $^3/_2$ ist.

Fig. 613.



Nach Ausführung der Konstruktion ist der Winkel $n'zs$ zu messen, welchen der einfallende Strahl ln mit dem austretenden $n'l'$ macht.

Dieselbe Aufgabe ist auch durch Rechnung unter der Voraussetzung zu lösen, daß der Brechungsexponent des Glases 1,53 ist.

164. Wie groß ist für dasselbe Prisma die Ablenkung D, wenn i gleich 48° 35′ und wenn $i = 42°$ ist.

165. Der brechende Winkel eines Flintglasprismas sei 60°, der Brechungsexponent des Glases 1,63. Durch Rechnung zu bestimmen, wie groß für $i = 52°$ der Winkel x, der Winkel y und der Winkel $i' = o'n'l'$ ist.

166. Für ein Glasprisma sei $g = 45°$, $n = 1{,}53$; wie groß werden x, y, i' und D für $i = 39°$, $i = 31°$ und für $i = 28°$ (durch Rechnung zu lösen)?

167. Für ein Glasprisma sei $g = 6°$ und $n = 1{,}53$; wie groß ist die Ablenkung, welche dieses Prisma hervorbringt, wenn für den einfallenden Strahl $i = 0$, oder $i = 10$, oder $i = 20°$ ist (durch Rechnung zu lösen)?

Die Lösung dieser Aufgabe wird zeigen, daß die Größe der Ablenkung für die drei gegebenen Werte von i nahezu dieselbe ist.

168. Welche Beziehung besteht zwischen den Winkeln x, y und g, Fig. 613? Wie groß ist $x + y$ für $g = 60^0$ und für $g = 45^0$?

169. In welchem Verhältnis steht jeder der Winkel x und y zu g für den Fall, daß $x = y$? Wie groß ist x und y, wenn $x = y$ und $g = 60^0$ oder $g = 45^0$?

170. Wenn der gebrochene Strahl nn', Fig. 613, gleiche Winkel mit der Eintritts- und Austrittsfläche des Prismas macht, wenn also $x = y$, so ist die durch das Prisma hervorgebrachte Ablenkung oder der Winkel D, welchen der einfallende Strahl ln mit dem austretenden $l'n'$ bildet, kleiner als für jede andere Richtung des Strahls im Prisma.

a. Wie groß ist nun das Minimum der Ablenkung für ein Prisma, dessen brechender Winkel 60^0 ist, wenn der Brechungsexponent seiner Substanz $^3/_2$ ist (durch Konstruktion zu lösen), oder wenn der Brechungsexponent 1,53 ist? (durch Rechnung zu lösen).

b. Dieselben Aufgaben zu lösen, wenn unter sonst gleichen Umständen der brechende Winkel des Prismas 45^0 ist?

c. Wie groß ist das Minimum der Ablenkung eines Flintglasprismas, wenn der Brechungsexponent seiner Substanz 1,63 ist, für einen brechenden Winkel $g = 60^0$ oder für $g = 45^0$?

d. Wie groß ist aber das Minimum der Ablenkung für ein Wasserprisma, dessen brechender Winkel 60^0 und für ein solches, dessen brechender Winkel 45^0 ist?

Berechnung der Brechungsexponenten.

(Zu §. 135.)

171. Das Minimum der Ablenkung, welches ein Flintglasprisma von einem brechenden Winkel $g = 60^0$ hervorbringt, ist 48,5 Grad; welches ist der Brechungsexponent dieser Flintglassorte?

172. Ein Crownglasprisma, dessen brechender Winkel 45^0 beträgt, bringt als Minimum eine Ablenkung von 26^0 hervor; welches ist der Brechungsexponent dieser Glassorte?

Sammellinsen.

(Zu den §§. 137 und 138.)

173. Der Krümmungshalbmesser einer gleichgewölbten bikonvexen Linse von der Form Fig. 290 S. 271 betrage 4 Centimeter. Wie groß ist die Brennweite der Linse, wenn der Brechungsexponent der Linsensubstanz 1,5 ist?

174. Auf der Achse dieser Linse, deren Durchmesser AB gleich 2 Centimeter sein mag, liege ein leuchtender Punkt S 18 Centimeter weit von der Mitte der Linse entfernt; es soll durch Konstruktion der Vereinigungspunkt R für das von S ausgehende, auf die Linse fallende Strahlenbündel gesucht werden.

175. Dieselbe Aufgabe zu lösen für den Fall, daß der Abstand des leuchtenden Punktes S von der Mitte der Linse 12, 8, 6 und 5 Centimeter beträgt?

176. Ein leuchtender Punkt T (vergleiche Fig. 294 auf Seite 275) liege auf der Achse eben dieser Linse um 1,5 Centimeter von der Mitte der Linse entfernt (also innerhalb der Brennweite); es soll durch Konstruktion die Lage des Punktes V ermittelt werden, von welchem die Strahlen nach ihrem Durchgang durch die Linse zu divergieren scheinen.

176a. Eine Sammellinse hat 10 Centimeter Brennweite ($f = 10$ Centimeter.) Wie groß ist die Vereinigungsweite b, wenn die Gegenstandsweite g der Reihe nach 500, 100, 30, 20, 15, 12, 9 und 6 Centimeter beträgt? (Durch Rechnung zu lösen.)

176b. Ein Papierschirm kann einer Linse bis auf 10 Centimeter genähert und bis auf 11 Centimeter von ihr entfernt werden. Wie weit muß für jede dieser beiden Grenzlagen des Schirmes ein leuchtender Gegenstand von der Linse entfernt sein, wenn ein scharfes Bild auf dem Schirme entstehen soll,

1) bei einer Brennweite der Linse von 10 Centimeter,

2) bei einer Brennweite der Linse von 8 Centimeter.

Linsenbilder.

(Zu §. 141.)

177. Von einem 1 Centimeter hohen Pfeile, welcher halb über, halb unter der Achse der in den Aufgaben 173 bis 176 besprochenen Linse liegt und dessen Mitte um 6 Centimeter von der Mitte der Linse entfernt ist, soll das Bild konstruiert werden. Wie verhält sich die Größe des Bildes zur Größe des Gegenstandes (vergleiche Fig. 299 auf Seite 277).

178. Das Bild eines Pfeiles zu konstruieren, dessen Mitte 18 Centimeter weit von der Mitte der Linse entfernt ist. Die Höhe des Pfeiles, welcher halb über, halb unter der Achse liegt, sei 3 Centimeter. Wie groß ist die Höhe des Bildes?

179. Innerhalb der Brennweite dieser Linse befinde sich ein halb über, halb unter der Achse liegender Pfeil von 1 Centimeter Höhe, dessen Mitte um 2 Centimeter von der Mitte der Linse entfernt ist (vergleiche Fig. 301 auf Seite 279). Es soll das Bild des Pfeils konstruiert werden.

Fernröhre.

(Zu §. 165.)

180. Das Objektiv eines Theaterperspektivs hat 8 Centimeter Brennweite, das Okular hat eine Zerstreuungsweite von 3,5 Centimeter; welches ist die Vergrößerung des Instruments?

181. Welches müßte die Zerstreuungsweite des Okulars sein, um mit demselben Objektiv eine 6fache Vergrößerung zu erzielen?

182. Wie groß müßte aber die Brennweite des Objektivs sein, um mit einem Okular von 3,5 Centimeter Zerstreuungsweite eine 6fache Vergrößerung zu erhalten?

183. Das Objektiv eines astronomischen Fernrohres hat 1,82 Meter Brennweite; welches ist die Vergrößerung, wenn das Okular aus einer einzigen Sammellinse von 3,5 Centimeter Brennweite besteht?

184. Wie groß müßte die Brennweite der einfachen Okularlinse sein, wenn für dasselbe Objektiv die Vergrößerung des Fernrohres eine 150fache sein sollte?

Viertes Buch.

Die elektrischen Erscheinungen.

Die Tangentenbussole.

(Zu §. 227.)

185. Nehmen wir als Einheit der Stromstärke diejenige, welche an der Tangentenbussole eine Ablenkung von 45° hervorbringt; wie groß ist alsdann die Stromstärke, welche den Ablenkungswinkeln 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° und 85° entspricht?

186. Welche Ablenkung wird bei Zugrundelegung der in der vorigen Aufgabe definierten Stromeinheit ein Strom hervorbringen, dessen Stromstärke $^1/_2$, 2, 5, 10, 20 ist?

Das Ohm'sche Gesetz.

(Zu §. 229.)

187. Sechs Zinkkohlenbecher sind zur Säule verbunden. Nach den in §. 232 des Grundrisses definierten Einheiten sei die elektromotorische Kraft eines einzelnen Bechers 21, der wesentliche Leitungswiderstand für jeden Becher sei gleich 0,6 und der Leitungswiderstand des gesamten Schließungsbogens sei 2. Wie groß ist die Stromstärke, welche der Apparat unter diesen Umständen liefert?

188. Ein einzelner Becher von der in der Aufgabe 187 besprochenen Art ist durch einen Schließungsbogen geschlossen, dessen Leitungswiderstand gleich 0,3 ist; wie groß ist die Stromstärke?

189. Eine Säule von 10 solchen Bechern und eine Säule von 50 Bechern wird durch einen Schließungsbogen geschlossen, dessen Leitungswiderstand gleich 0,3 ist; wie groß ist in diesen beiden Fällen die Stromstärke?

190. Welche Stromstärke wird eine Säule von 1, von 10, von 50 Zinkkohlenbechern erzeugen, wenn der Leitungswiderstand im Schließungsbogen gleich 20 ist?

191. Dieselben Aufgaben 187 bis 190 unter der Voraussetzung zu lösen, daß Daniell'sche Becher an die Stelle der Zinkkohlenbecher gesetzt werden und die elektromotorische Kraft e eines solchen Bechers gleich 12, sein wesentlicher Leitungswiderstand aber gleich 1 ist.

Leitungswiderstand der Metalle.

(Zu §. 230.)

192. Wie groß ist der Leitungswiderstand eines 5000 Meter langen und 3 Millimeter dicken Eisendrahtes nach der Siemens'schen Quecksilbereinheit?

193. Wie groß ist nach der Siemens'schen Einheit der Leitungswiderstand eines 20 000 Meter langen Kupferdrahtes von 2,5 Millimeter Durchmesser?

194. Wie dick muß man einen Eisendraht machen, wenn er bei gleicher Länge den gleichen Leitungswiderstand haben soll, wie der in der vorigen Aufgabe besprochene Kupferdraht?

195. Wie lang müßte ein Neusilberdraht von 0,75 Millimeter Durchmesser sein, wenn sein elektrischer Leitungswiderstand gleich dem des Kupferdrahtes sein sollte, welcher in der 193. Aufgabe besprochen wurde?

106. Um den Leitungswiderstand s einer Magnetisierungsspirale durch den Versuch zu bestimmen, wurde in folgender Weise verfahren:

a. Sechs große Zinkkohlenbecher wurden zu einem einzigen Plattenpaare verbunden und durch eine etwas lange Leitung von dickem Kupferdraht mit der Tangentenbussole verbunden. Die letztere hatte den Reduktionsfaktor 70 und ihr Ausschlag betrug 53^0.

b. Als nun in den Schließungsbogen ein Draht eingeschaltet wurde, dessen Leitungswiderstand gleich 2,5 war, sank die Ablenkung auf $11{,}5^0$.

c. Nach Entfernung des Leitungswiderstandes 2,5 wurde die Magnetisierungsspirale eingeschaltet und nun stellte sich die Nadel der Tangentenbussole auf 20^0.

α. Wie groß ist der innere Leitungswiderstand L des Elektromotors samt der Kupferdrahtleitung, welche ihn mit der Tangentenbussole verbindet?

β. Wie groß ist der Leitungswiderstand s der Magnetisierungsspirale?

197. Ein zweiter Versuch zur Bestimmung des Leitungswiderstandes derselben Magnetisierungsspirale wurde in der Weise angestellt, daß die erwähnten sechs Zinkkohlenbecher zur Säule kombiniert wurden. Als die Säule nur durch die Kupferdrahtleitung mit der Tangentenbussole verbunden wurde, war der Ausschlag 63^0; durch Einschaltung des Leitungswiderstandes 2,5 sank er auf 39^0; als aber statt des Leitungswiderstandes 2,5 die Magnetisierungsspirale eingeschaltet wurde, ergab sich die Ablenkung 48^0. Es ist nun die Frage

α. Wie groß ist der Leitungswiderstand L' der Säule samt der Kupferdrahtleitung, welche sie mit der Bussole verbindet?

β. Wie groß ist der Leitungswiderstand s der Magnetisierungsspirale?

Der Wert von s, wie er sich als Resultat der Aufgabe 197 herausstellt, wird mit dem aus 196 erhaltenen nicht ganz übereinstimmen. Der wahrscheinlichere Wert des fraglichen Leitungswiderstandes ist das Mittel aus den beiden für s erhaltenen Werten.

198. Bezeichnen wir mit l den Leitungswiderstand der Drahtleitung, welche den Elektromotor mit der Tangentenbussole verbindet, mit r den Leitungswiderstand eines Bechers, so haben wir für den in der Aufgabe 196 betrachteten Leitungswiderstand L

$$L = l + \frac{r}{6},$$

für den in der Aufgabe 197 vorkommenden Widerstand L' aber haben wir

$$L' = l + 6r.$$

Wie groß ergeben sich l und r, wenn man für L und L' die oben berechneten Zahlenwerte einführt?

Aichung der Tangentenbussole.

(Zu §. 232.)

199. In den Schließungsbogen einer Säule von 8 Bunsen'schen Bechern wurde gleichzeitig eine Tangentenbussole und ein Voltameter eingeschaltet. Der Strom brachte an der Tangentenbussole eine Ablenkung von 24° 18′ hervor, während in 1 Minute 35 Kubikcentimeter Knallgas im Voltameter entwickelt wurden. Welches ist der Reduktionsfaktor R der Tangentenbussole, d. h. mit welchem Faktor muß man die trigonometrische Tangente des Ablenkungswinkels multiplizieren, um die in Kubikcentimetern ausgedrückte Gasmenge zu erhalten, welche der entsprechende Strom in 1 Minute liefert?

200. Zur Bestimmung des Reduktionsfaktors der eben besprochenen Tangentenbussole wurden statt eines einzigen eine Reihe von Versuchen gemacht, bei welchen als Rheomotor (Stromerreger) eine aus Bunsen'schen Bechern gebildete Säule angewendet wurde. Die Resultate dieser Versuchsreihe sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Zahl der Becher.	Ablenkung.	Entwickelte Gasmenge in 1 Minute.
12	28° 30′	41,7 ccm
8	24° 48′	35,0 „
6	22° 0′	30,8 „
4	18° 45′	26,0 „
3	13° 45′	18,7 „
2	5° 54′	7,9 „

Wie groß ist nach jedem dieser Versuche der Reduktionsfaktor der Tangentenbussole? Welches ist der Mittelwert dieses Reduktionsfaktors?

Fünftes Buch.

Von der Wärme.

Das Thermometer.

(Zu §. 255.)

201. Welcher Grad der Reaumur'schen Skala entspricht dem 23. Grade der Celsius'schen.

202. Welches ist die Temperatur von 78° C. nach dem Fahrenheit'schen Thermometer?

203. Wie viel Grad Celsius sind 61° R.?

204. Die Temperatur von 93° Fahrenheit nach der Celsius'schen Skala auszudrücken.

205. Welcher Grad der Reaumur'schen Skala entspricht der Temperatur von 105° Fahrenheit?

206. Welcher Grad der Fahrenheit'schen Skala entspricht der Temperatur — 12° R.?

207. Für welche Temperatur fallen die Angaben des Celsius'schen und des Fahrenheit'schen Thermometers zusammen?

208. Für welche Temperatur fallen die Angaben des Reaumur'schen und des Fahrenheit'schen Thermometers zusammen?

209. In §. 255 sind die Gleichungen entwickelt worden, welche die Beziehungen zwischen der Celsius'schen, der Reaumur'schen und der Fahrenheit'schen Skala angeben. In gleicher Weise soll nun eine Formel entwickelt werden, nach welcher man die Temperaturangaben einer willkürlichen Skala, deren Eispunkt bei 15° und deren Siedepunkt bei 165° liegt, auf die drei oben genannten Skalen reduzieren kann.

Lineare Ausdehnung fester Körper.

(Zu §. 256.)

210. Eine eiserne Gitterbrücke hat bei 0° eine Länge von 60 Meter; wie lang wird sie sein, wenn sie im Sommer durch den Einfluß der Sonnenstrahlen auf + 40° C. erwärmt wird?

211. Wie lang ist dieselbe Brücke bei einer Temperatur von — 20° C.?

212. Ein Messingstab hat sich bei einer Temperaturerhöhung von 0 bis 90° C. um 2 Millimeter ausgedehnt; wie groß war seine Länge bei 0°?

213. Ein Kupferstab, welcher bei 0° 1,5 Meter lang war, hat sich bei einer Temperaturerhöhung von 100° C. um 2,6 Millimeter ausgedehnt; wie groß ist demnach der Ausdehnungs-Koëfficient des Kupfers?

214. Bezeichnen wir die Länge, welche ein Körper bei 0° einnimmt, mit L_0, seine Länge bei t^0 mit L_t; wie groß ist dann sein Ausdehnungs-Koëfficient?

215. Ein Messingstab hat bei 15° C. eine Länge von 1,8 Meter; wie lang wird er bei 75° C. sein?

216. Ein Eisenstab hat bei — 20° C. eine Länge von 4,5 Meter; wie lang wird er bei + 36° C. sein?

217. Es sei L_t die Länge eines Stabes bei t^0, a der Ausdehnungs-Koëfficient der Substanz; wie groß ist seine Länge L bei einer Temperatur von τ^0?

218. An einem aus Zink- und Eisenstäben konstruierten Kompensationspendel, Fig. 521, sei die Länge des Stabes S (von seinem Aufhängepunkte bis zur Mitte der Linse) gleich 1,3 T (d. h. 1,3mal so lang als jeder der Zinkstäbe T); wie groß muß die Länge eines jeden der Eisenstäbe R sein?

219. Die beiden Stäbe T seien von Messing, die Länge des Stabes S sei 1,2 T; wie groß müßte die Länge eines jeden der beiden Eisenstäbe R sein, wenn die Vorrichtung Fig. 521 Seite 493 wirklich ein Kompensationspendel bilden sollte?

Das Resultat dieser Rechnung zeigt, warum man aus drei Eisenstäben und zwei Messingstäben nach dem in Fig. 521 dargestellten Schema kein Kompensationspendel konstruieren kann.

Kubische Ausdehnung.

(Zu §. 257.)

220. Wie groß ist der kubische Ausdehnungs-Koëfficient für die in der Tabelle auf Seite 492 aufgeführten Körper? Die erhaltenen Resultate sind gleichfalls tabellarisch zusammenzustellen.

221. Ein Hohlwürfel von Zinkblech hat bei 0° einen Kubikinhalt von 1 Kubikdecimeter; wie groß wird der Rauminhalt dieses Würfels bei 32° C. sein?

222. Ein Glasgefäß mit engem Halse faßt bei 0° bis zu einer Marke am Halse genau 1000 Kubikcentimeter; welches ist der Rauminhalt dieses Gefäßes bei 100° C.?

223. Bei 0° ist das specifische Gewicht des Bleies 11,352; wie groß wird das specifische Gewicht des Bleies bei 100° C. sein?

224. Durch einen direkten Versuch fand Kopp den kubischen Ausdehnungs-Koëfficienten für weiches Natronglas gleich 0,000026, für hartes Kaliglas aber gleich 0,000021; wie groß wäre demnach der Längenausdehnungs-Koëfficient dieser Glassorten?

225. Nach Kopp's Versuchen ist der kubische Ausdehnungs-Koëfficient

des Quarzes gleich 0,000042; wie groß ist der Längenausdehnungs-Koëfficient dieses Minerals?

Ausdehnung der Flüssigkeiten.

(Zu §. 258.)

226. Das Quecksilber, welches ein Glasgefäß von der Form Fig. 614 bei 0° vollständig bis zur Spitze ausfüllt, wiegt 264 Gramm. Bis auf 100° C. erwärmt, tritt etwas Quecksilber tropfenweise aus der Spitze aus. Nachdem der Apparat so lange der Temperatur von 100° C. ausgesetzt war, daß das Ausfließen von Quecksilber aufgehört hat, daß man also überzeugt sein konnte, alles im Gefäße eingeschlossene Quecksilber sei auf 100° C. erwärmt, wurde abermals gewogen und nun fand man, daß das Gewicht des eingeschlossenen Quecksilbers nur noch 260 Gramm beträgt. Welches ist der Koëfficient der scheinbaren Ausdehnung des Quecksilbers? Wie groß ist die absolute Ausdehnung des Quecksilbers? (Das Gefäß bestand aus weichem Natronglas.)

Fig. 614.



227. Das Quantum Benzol, welches ein Glasgefäß von der Form Fig. 524 auf Seite 497 bei 0° bis zur Marke *a* füllt, wiegt 18,76 Gramm. Das Gefäß wird samt seinem Inhalt auf 60,5° erwärmt, alle Flüssigkeit entfernt, welche über *a* steht, und nun ergiebt eine abermalige Wägung, daß die noch im Gefäß enthaltene Flüssigkeit 18,47 Gramm wiegt. Welches ist der Ausdehnungs-Koëfficient für die scheinbare und welches für die absolute Ausdehnung des Benzols?

228. Welchen Raum nimmt bei 92° C. das Quantum Olivenöl ein, welches bei 0° C. genau 1 Liter füllt?

229. Man kauft bei — 10° C. 1 Liter Weingeist, dessen specifisches Gewicht bei 0° gleich 0,809 ist. Welchen Raum nimmt derselbe bei + 32° C. ein?

230. Wie groß ist das specifische Gewicht des in der vorigen Aufgabe besprochenen Alkohols?

231. Bei einer Temperatur von 24° C. hat man die Barometerhöhe gleich 752 Millimeter gefunden. Diese Barometerhöhe ist auf 0° zu reduzieren, d. h. es ist zu berechnen, wie hoch die Barometersäule bei gleichem Luftdruck sein würde, wenn sie auf 0° erkaltet wäre?

Ausdehnung der Gase.

(Zu §. 259.)

232. Ein gegebenes Quantum Leuchtgas nimmt bei 0° einen Raum von 46 Kubikmeter ein. Welchen Raum wird diese Gasmasse bei unverändertem Druck einnehmen, wenn ihre Temperatur auf 23° C. gesteigert wird?

233. In einem Voltameter hat man bei 18° C. 73 Kubikcentimeter

Knallgas aufgefangen. Wie groß wird bei unverändertem Druck das Volumen dieser Gasmenge sein, wenn sie auf 0° erkaltet wird?

234. Das specifische Gewicht der Luft bei 0° und bei einem Barometerstand von 760 Millimeter ist 0,001293, das des Wassers gleich 1 gesetzt. Wie groß ist das specifische Gewicht der Luft bei unverändertem Druck und einer Temperatur von 93° C.

Schmelzungswärme.

(Zu §. 262.)

235. In eine Wassermasse von 461,3 Gramm, deren Temperatur 16,86° ist, werden 43,8 Gramm Schnee von 0° geworfen. Nach vollständiger Schmelzung des Schnees ist die Temperatur des Wassers auf 8,53° erniedrigt. Wie groß ergiebt sich nach diesem Versuch der Wert für die Schmelzung des Schnees?

236. 50,45 Gramm Schnee von 0° C. werden in Wasser von 16,1° C. geworfen. Nach vollendeter Schmelzung findet man die Temperatur des Wassers gleich 6,78° C. Wie groß ist nach diesem Versuche das Gewicht des ursprünglich flüssigen Wassers?

237. Ein 92 Gramm schweres Stück Eis von 0° wird in eine 1200 Gramm schwere Wassermasse von 23° C. geworfen. Welches ist die Temperatur des Wassers nach der Schmelzung des Eises?

238. In eine Wassermasse von 2000 Gramm, welche eine Temperatur von 25° C. hat, werden 1000 Gramm Eisstücke von 0° geworfen. Wie viel Eis wird geschmolzen sein, bis das Wasser auf 0° erkaltet ist?

NB. Bei Lösung der Aufgaben 236, 237 und 238 soll die latente Wärme des Wassers gleich 80 angenommen werden und vorausgesetzt sein, daß das Wasser nach außen hin weder Wärme abgiebt, noch solche von außen empfängt.

Spannkraft der Dämpfe.

(Zu §§. 267 und 268.)

239. Welches ist nach der Gleichung auf Seite 514 die Temperatur, bei welcher das Maximum der Spannkraft des Wasserdampfes gleich ist $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$, 1, 3, 5, 10, 20, 30 Atmosphären?

240. Welches ist nach derselben Gleichung die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes für eine Temperatur von 25, 55, 95, 120, 150 und 180 Grad Celsius?

241. Nach den auf Seite 516 gemachten Angaben soll die Beziehung zwischen Spannkraft (p) und Volumen (V) des gesättigten Wasserdampfes graphisch dargestellt werden.

Um diese Aufgabe zu lösen, markiere man auf einer horizontalen Linie die Punkte, welche von einer beliebigen Stelle an gemessen 1, 2, 4 und 10

Centimeter nach der Rechten liegen und errichte in jedem dieser Punkte ein Perpendikel. Auf dem Perpendikel von 1 trage man die Länge 164,6 Millimeter (dem Volumen 1646 entsprechend), in den Punkten 2, 4 und 10 aber trage man die Längen 85,1, 43,5 und 18,3 (dem Volumen 851, 436 und 183 entsprechend) auf. Die Kurve, welche die Gipfelpunkte der so aufgetragenen Ordinaten verbindet, stellt alsdann den fraglichen Zusammenhang graphisch dar. Diese Zeichnung ist mit möglichster Sorgfalt auszuführen.

242. Wie viel Liter gesättigten Dampfes von 3, 5, 6, 7, 8 und 9 Atmosphären Spannkraft liefert 1 Liter Wasser?

Zur Lösung dieser Aufgabe dient die nach der vorigen Aufgabe konstruierte Figur. Man hat nämlich nur in den Punkten 3, 5, 6, 7, 8 und 9 der Abscissenachse Perpendikel zu errichten und zu messen, wie viel Millimeter die Länge der Ordinaten der Kurve für diese Abscissenpunkte beträgt. Die so erhaltenen Zahlen, welche tabellarisch zusammenzustellen sind, geben die Antwort auf obige Frage. Die Lösung dieser Aufgabe ist mit Sorgfalt auszuführen, weil von den Resultaten derselben später Gebrauch gemacht wird.

243. Für welche Temperatur wäre nach dem Dalton'schen Gesetze die Spannkraft des Alkoholdampfes gleich dem Druck von 2, 4, 8 Atmosphären?

244. Dieselbe Aufgabe zu lösen für schweflige Säure, Schwefelkohlenstoff und Terpentinöl.

NB. Die Siedepunkte dieser Flüssigkeiten, welche man zur Lösung dieser Aufgabe kennen muß, findet man auf Seite 536.

Berechnung des Effektes der Dampfmaschinen.

(Zu §. 274.)

245. Wie groß ist nach Gleichung 2), Seite 532, die absolute mechanische Arbeit, welche 1 Kilogramm Wasserdampf an den Kolben einer Dampfmaschine übertragen kann, wenn p gleich dem Druck von 1, 2, 3, ... 10 Atmosphären ist?

(NB. Der Wert von pV ergiebt sich aus der Auflösung der Aufgabe 242.)

246. Der Kolben einer Dampfmaschine hat 3 Decimeter Durchmesser, der Kolbenhub ist 9 Decimeter. Wenn nun der Kolben in 3 Sekunden einen Auf- und einen Niedergang vollendet und wenn die Spannkraft des Dampfes, welche ihn treibt, gleich dem Druck von 4 Atmosphären ist, wie viel Meterkilogramm nutzbarer Arbeit $\left(\text{gleich } \frac{E}{2} \text{ angenommen}\right)$ vollbringt dann die Maschine in 1 Minute? Wie vielen Pferdekräften ist die Maschine unter den gegebenen Umständen gleichzusetzen?

247. Wie viel Kilogramm Wasserdampf konsumiert eine Dampfmaschine von 10 Pferdekräften (nutzbarer Arbeit) während einer Stunde, wenn der Dampf, welcher den Kolben treibt, 3, 5, 8 Atmosphären Spannkraft hat?

Verdampfungswärme.

(Zu §. 277.)

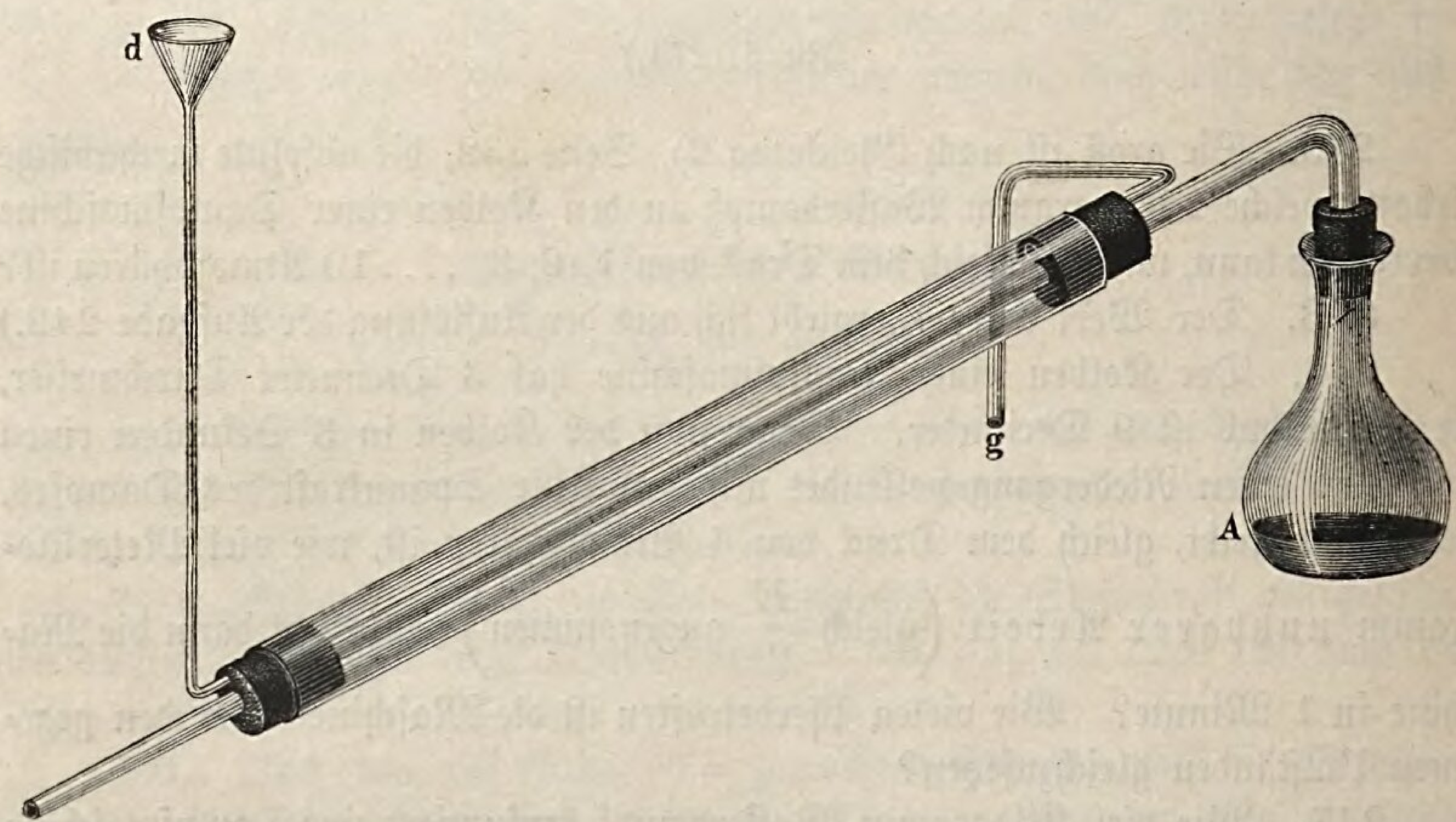
248. In einem Kühlfaß von der Form Fig. 560 Seite 540 sind 60 Kubikdecimeter Kühlwasser enthalten, welches zu Anfang der Operation eine Temperatur von 8° C. hatte. In der Blase *B* befindet sich Wasser, welches überdestilliert werden soll. Nachdem aus dem Kühlrohre bei *O* 2 Liter destillierten Wassers abgeflossen sind, findet man, daß die Temperatur des Kühlwassers auf 28,5° C. gestiegen ist. Aus diesen Daten ist die latente Wärme des Wasserdampfes zu berechnen.

249. In demselben Apparate, welcher in der vorigen Aufgabe besprochen wurde, wird unter sonst ganz gleichen Umständen aus der Blase *B* Weingeist destilliert. Nachdem 3 Kilogramm Weingeist überdestilliert sind, ist die Temperatur der 60 Kubikdecimeter Kühlwasser von 8° C. auf 22° C. gestiegen. Wie groß ist nach diesem Versuche die latente Wärme des Weingeistdampfes?

250. Derselbe Versuch wird mit Äther wiederholt, und man findet, daß die Temperatur der 60 Kilogramm Kühlwasser von 8° C. auf 17° C. gestiegen ist, nachdem 5 Kilogramm Äther überdestilliert sind. Wie groß ist danach die latente Wärme des Ätherdampfes?

(NB. Bei Auflösung dieser Aufgaben soll abgesehen werden von der Wärme, welche das Kühlwasser an die Umgebung verliert oder von der Umgebung etwa aufnimmt.)

Fig. 615.



Bei den beiden letzten Aufgaben muß noch in Rechnung gebracht werden daß die specifische Wärme des Alkohols und des Äthers geringer ist als die des

Wassers. Wir wollen den Wert für die specifische Wärme des Äthers und des Alkohols gleich 0,5 setzen, also annehmen, daß die Wärmemenge, welche 1 Kilogramm Alkohol oder Äther bei einer Temperaturerniedrigung von 1° C. verliert, gerade hinreicht, um die Temperatur von 1 Kilogramm Wasser um 0,5° C. zu erhöhen.)

251. In einem Kühlapparate von der in Fig. 614 dargestellten Einrichtung sind 420 Gramm Kühlwasser von 10° C. enthalten. Wie hoch wird die Temperatur dieses Kühlwassers gestiegen sein, nachdem man a. 15 Gramm Wasser, oder b. 25 Gramm Weingeist, oder c. 35 Gramm Äther aus dem Gefäße *A* überdestilliert hat?

Specifische Wärme.

(Zu §. 279.)

252. Wie viel Wärmeeinheiten sind nötig, um die Temperatur von 793 Gramm Quecksilber um 45° C. zu erhöhen?

253. Wie viel Wärmeeinheiten sind erforderlich, um 60 Kilogramm Eisen von 10° C. auf 150° C. zu erwärmen?

254. Wie viel Kalorieen müssen einer Masse von 1523 Gramm Weingeist (specif. Gewicht 0,807) zugeführt werden, wenn seine Temperatur von 15° C. bis auf 63° C. erhöht werden soll.

255. In 180 Gramm Wasser von 19° C. werden einige Stückchen Eisen eingetaucht, welche zusammen 60 Gramm wiegen und auf 100° C. erwärmt sind. Nach vollständiger Ausgleichung der Temperatur findet man, daß die Temperatur des Kühlwassers auf 22° C. gestiegen ist. Wie groß ist nach diesem Versuche die specifische Wärme des Eisens?

256. Um die specifische Wärme des Quecksilbers zu ermitteln, wurden 80 Gramm dieses Metalls auf 98° C. erwärmt, in 112 Gramm Wasser von 10° C. gegossen, welches in einem Glaskolben enthalten war. Nach gehörigem Schütteln fand man, daß die Temperatur des Kühlwassers auf 12° C. gestiegen war. Wie groß ist nach diesem Versuch die specifische Wärme des Quecksilbers? (Auf die Wärmezunahme des Glasgefäßes ist keine Rücksicht zu nehmen.)

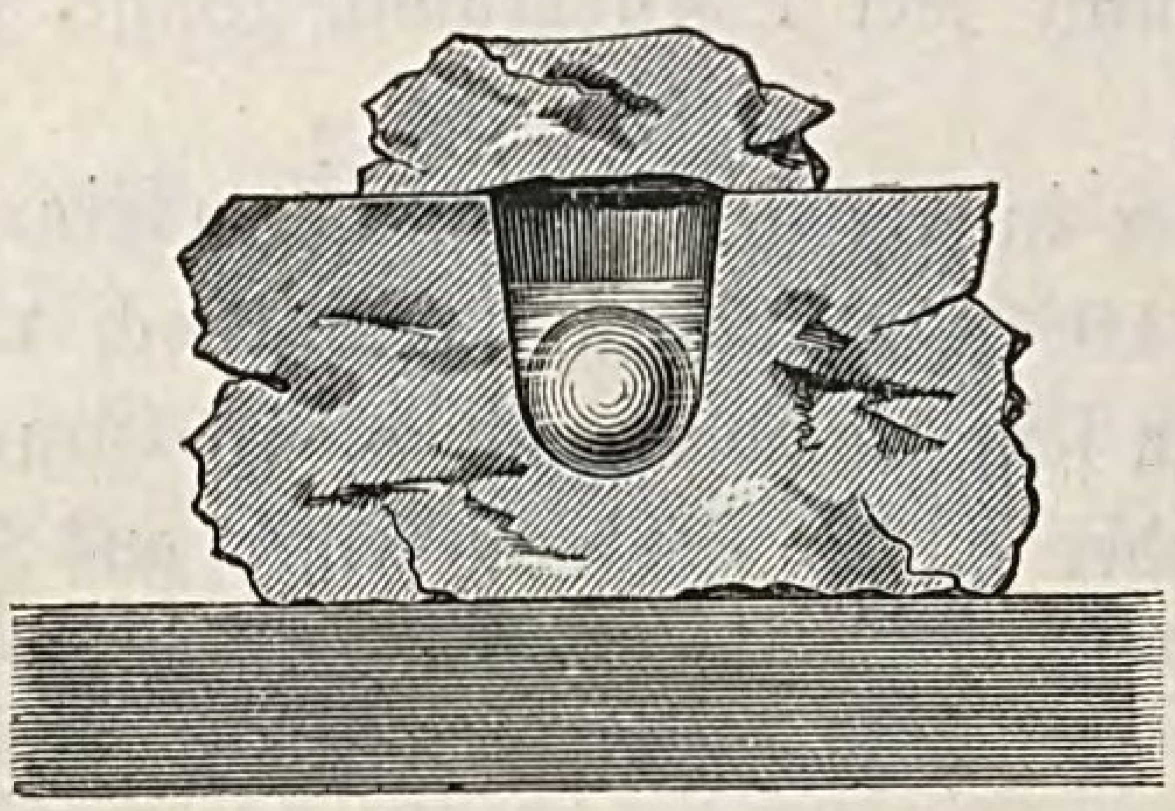
257. Um die specifische Wärme des Benzols zu finden, wurde folgender Versuch angestellt. 43,5 Gramm Benzol von 65° C. wurden in ein Kölbchen gegossen, welches 100 Gramm Wasser von 8° C. enthielt. Nach tüchtigem Schütteln war die Temperatur der Mischung 15,5° C. Aus diesen Angaben soll die specifische Wärme des Benzols berechnet werden.

258. Es werden 250 Gramm Wasser von 5° C. und 250 Gramm Terpentinöl von 50° C. zusammengeschüttelt. Welches wird die Temperatur der Mischung sein?

259. In einer Masse von 600 Gramm Wasser von 10° C. wird eine 83 Gramm schwere, auf eine Temperatur von 340° C. erwärmte eiserne Kugel eingetaucht. Wie hoch wird die Temperatur des Kühlwassers nach vollständiger Abkühlung der Kugel sein?

260. Eine 200 Gramm schwere Platinkugel war in dem Feuer eines Ofens stark erhitzt und dann in einer Wassermasse von 1000 Gramm abgelöscht worden; infolge davon stieg aber die Temperatur des Wassers von 13° C. auf 20° C. Wie hoch war demnach die Temperatur der Platinkugel vor dem Eintauchen?

Fig. 616.



Zur Lösung dieser Aufgabe muß natürlich die specifische Wärme des Platins bekannt sein.

261. Ein Eisblock von 0°, in welchen man eine Höhlung gemacht hat, ungefähr wie Fig. 616 zeigt, befindet sich in einem Raume, dessen Temperatur noch etwas unter 0° ist, so daß ein Schmelzen des Eises durch den Einfluß der äußeren Umgebung nicht stattfinden kann. In diese Höhlung wird nun eine 200 Gramm schwere, auf 100° C. erwärmte eiserne Kugel gelegt und dann sogleich die Oeffnung durch ein Eisstück verschlossen. Nachdem die Kugel auf 0° erkaltet ist, findet sich, daß 29,3 Gramm Eis geschmolzen worden sind. Wie groß ist danach die specifische Wärme des Eisens?

Auflösungen

der

Aufgaben

zum

Grundriß der Physik

und

Meteorologie.

Einleitung.

Specifisches Gewicht.

1. $S = \frac{53}{6} = 8,833.$
2. $V = \frac{59}{2,84} = 20,774$ Kubikdecimeter.
3. $P = 6,8 \,.\, 7,8 = 53,04$ Kilogramm.
4. $V = \frac{4}{3} \cdot 3,14\, r^3 = \frac{500}{11,3}.$

   $r = 2,193$ Centimeter, also ist der gesuchte Durchmesser gleich 4,386 Centimeter.
5. $V = \frac{6000}{13,589} = 441,2$ Kubikcentimeter.
6. $P = 100 \,.\, 0,793 = 79,3$ Kilogramm.
7. $V = \frac{500}{0,00198} = 252525$ Kubikcentimeter oder 252,52 Liter.
8. $V = 5592$ Liter.
9. 1,124 Decimeter hoch.
10. Der Durchmesser beträgt 13,15 Centimeter.
11. Der Durchmesser des Röhrchens ist 0,827 Millimeter.
12. 26235 Mark.

Erstes Buch.

Mechanik.

Das Parallelogramm der Kräfte.

13. $R = 12$ Kilogramm.
    $\alpha = 17\frac{1}{2}$ Grad.
14. $x = 84^0$.
15. $x = 146^0$.
16. $R = 8,5$ Kilogramm.
17. Um die Resultierende = 8 Kilogramm zu erhalten, muß der Winkel der Seitenkräfte beinahe 74^0, um die Resultierende = 2 Kilogramm zu erhalten, muß er 157^0 sein.
18. Jede der beiden muß gleich 4,4 Kilogramm sein.

18 a. Die eine beträgt nahezu 3,5, die andere 2 Kilogramm.

18 b. Sie fallen in die Richtung der Mittelkraft.

18 c. Die Seitenkraft beträgt 2,5 Kilogramm und der gesuchte Winkel 45^0.

Flaschenzüge.

19. Mit einer Kraft von $1\frac{1}{4}$ Centner.
20. Mit einer Kraft von $31\frac{1}{2}$ Kilogramm.

Der Hebel.

21. $Q = 14$ Kilogramm.
22. Das statische Moment ist 560 wenn das Gewicht in Kilogrammen, der Hebelarm in Centimetern ausgedrückt ist.
23. $BC = 28,4$ Centimeter.
24. Die Summe der statischen Momente von P und Q ist 2378.

    $R = 339,7$ Gramm.
25. Mit einer Kraft von 62,5 Kilogramm.

Der einarmige Hebel.

26. $N = 1213{,}3$ Gramm.
27. Mit einer Kraft von 225 Pfund.

Gleichgewicht am Hebel bei schiefwinklig angreifenden Kräften.

28. $P = 2{,}7$ Kilogramm.
29. Das statische Moment jeder der beiden Kräfte ist 12,3.
30. Nahezu unter einem Winkel von 62^0.

Haspel und Räderwerke.

31. 96,5 Kilogramm.
32. Jeder Arbeiter muß mit einem Druck von 21 Kilogramm arbeiten.

Schiefe Ebene.

33. Nahezu 9 zu 100.
34. 1 zu 20, 1 zu 10, 1 zu 6,6 . . .
35. Die Steigung beträgt 15 Prozent. Der Neigungswinkel ist etwas über $8^1/_2$ Grad ($8^0\,38'$).
36. Für 3 Prozent Steigung 1 Pferd.
    „ 7 „ „ 2 Pferde.
    „ 12 „ „ 5 „
37. 8 Pferde.

Die Schraube.

38. a. Die Steigung beträgt 8 Prozent.
    b. Mit einer Kraft von 12 Kilogramm.
    c. 1,2 Kilogramm (NB. ohne Berücksichtigung der Reibung).
39. $K = 2340$ Kilogramm.

Der Keil.

40. Mit einer Kraft von 25 Kilogramm.
41. Mit einer Kraft von 200 Kilogramm.

Festigkeit.

42. $P = 3 \,.\, 1021 = 3063$ Kilogramm.
43. $n = 3{,}14 \,.\, 0{,}6^2 = 1{,}13$ Quadratcentimeter.
    $P = 1{,}13 \,.\, 4182 = 4725{,}6$ Kilogramm.

44. $500 = 3{,}14 \, . \, r^2 \, . \, 3550$
$r = 0{,}2117$ Centimeter. Der Draht muß also 0,423 Centimeter dick sein.

45. $n = 3{,}14\,(5^2 - 4^2)$ Quadratcentimeter.
$P = 118183$ Kilogramm.

46. $4000 = 3{,}14 \, . \, 1{,}5^2 \, . \, k$
$k = 566{,}1$ Kilogramm.

47. Für den Festigkeitsmodulus 1359 ergiebt sich $Q = 32616$ Kilogramm.

48. Um diese Aufgabe zu lösen, hat man die Zahlen der Tabelle auf Seite 61 des Grundrisses mit 2.6,76, also mit 13,52 zu multiplizieren. Es ergiebt sich dann der Festigkeitsmodulus für

Lindenholz			12411	Pfund
Kiefernholz			13804	„
Weißtanne . . .	8125	bis	12550	„
Eichenholz . . .	15548	„	19820	„
Buchenholz . . .	18213	„	21442	„
Ebenholz			12627	„
Kupfer			37612	„
Messing			47996	„
Gold			62800	„
Blei			3677	„
Zinn			6178	„
Silber			46035	„
Eisen			56541	„
Glas	1919	bis	4992	„
Hanfseile	4732	„	8382	„

49. $Q = 46013$ Pfund.

Die hydraulische Presse.

50. Mit einer Kraft von 30,85 Kilogramm.
51. $K = 8100$ Kilogramm.
52. $r = 0{,}933$ Centimeter.

Boden- und Seitendruck der Flüssigkeiten.

53. 42 Kilogramm.
54. 11,014 Kilogramm.
55. 10,5 Kilogramm.
56. 103,6 Kilogramm.

Gewichtsverlust untergetauchter Körper.

57. Die Kugel wird in Wasser noch 5,167 Kilogramm wiegen.
58. Wenn der Würfel auf seiner Grundfläche aufrecht schwimmt, wird noch 0,45 der Würfelhöhe aus dem Wasser hervorragen.
59. Mit einer Kraft von 231 Gramm.
60. Das Stück enthält 765 Gramm Silber.
61. 986,6 Gramm.

Nicholson's Aräometer.

62. $\frac{6,85}{2,57} = 2,66.$

Skalenaräometer.

63. 1,39 . . . 1,17 . . . 1,08.
64. 0,926 . . . 0,854 . . . 0,781.
65. 128 . . . 107 . . . 87,7 . . . 59,5.

Kapillarerscheinungen.

66. 69,9 Millimeter.
67. 30,5 Millimeter.
68. 0,138 Millimeter.

Das Mariotte'sche Gesetz.

69. a. 538,1 Kubikmeter.
b. 518,5 „
70. 249,5 Kubikcentimeter.
71. 132 Kubikcentimeter.
72. 20,56 Liter.

Messung des Druckes eingeschlossener Gase.

73. Wie 747,2 zu 745.
74. Wie 776 zu 753.
75. 2460 Millimeter oder 3,2 Atmosphären.
76. Nahezu $2^1/_6$, $4^1/_4$, $6^2/_7$ Atmosphären.
77. 11 Centimeter hoch für 2 Atmosphären.
17,3 Centimeter hoch für 4 Atm.
21 „ „ „ 8 „

voraussgesetzt, daß man die Variationen des Quecksilberspiegels im Gefäß vernachlässigt.

78. Etwas über 4 Atmosphären.

Der Luftballon.

79. Die Steigkraft ist gleich 3 Gramm.
80. 155 Kilogramm.
81. Nein.
82. 230 Kilogramm.

Das Fallgesetz.

83. 1) 16, 24, 32, 40 Decimeter.
2) 4, 16, 36, 64, 100 „
3) 12, 20, 28, 36 „

83 a. 0,04904, 0,19616, ... 3,97224 Meter.
83 b. Die Tiefe des Brunnens beträgt 60 Meter.
84. 14,28 Sekunden.
85. Mit 14,01, 19,81, 49,70 Meter.

Gleichförmig verzögerte Bewegung.

86. In 1,02, 5,10, 10,20, 20,40 Sekunden und steigt beziehungsweise 5,10, 127,5, 510, 2040 Meter.

Centralbewegung und Schwungkraft.

87. $p = 0{,}002668$ Meter.
88. $s = 0{,}001334$ Meter.
89. $P = 289{,}2$ Gramm.
90. $p = 140{,}3$ Meter.
91. $v = 0{,}0335$ Meter.
92. Die Erde müßte sich in 1 Stunde 24 Minuten und 22 Sekunden um ihre Achse drehen.

Gesetze der Pendelschwingungen.

93. $g = 9{,}806$ Meter.
94. $l = 99{,}36$ Centimeter.
95. $t = 4{,}486$ Sekunden.
96. 24,78 Meter.
97. $l = 24{,}84$ Centimeter.
98. 11,8 Meter.
99. Auf dem Mond 3,569, auf dem Jupiter 0,8857 Sekunden.

Lebendige Kraft.

100. 37480 Meterkilogramm.
101. 0,4078 Meterkilogramm.
102. 81,56 Kilogramm.
103. 1,57 Centimeter.
104. 350 Meterkilogramm.
105. 68 Meterkilogramm.
106. 282 Meterkilogramm.

Ausflußgeschwindigkeit.

107. a. $v = 1,4$ Meter.
b. $v = 3,13$ „
c. $v = 5,6$ „
108. a. $S = 0,0046$ Meter.
b. $S = 2,073$ „
c. $S = 2,945$ „

Ausflußmenge.

109. a. $Q = 29$ Liter in der Minute.
b. $Q = 53$ „ „ „ „
c. $Q = 565$ „ „ „ „

Ausströmen der Gase.

110. $v = 55$ Meter.
111. a. $v = 44,7$ Meter.
b $v = 209,7$ „

Zweites Buch.

Akustik.

Geschwindigkeit des Schalles.

112. 2556,68 Meter. (Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu 340,89 Meter angenommen.)

113. 8522 Meter.

114. 3315 Meter.

115. 7,39 Sekunden.

116. Die Aufgabe führt zu der Gleichung:

$$5{,}5 = \frac{s}{340{,}89} + \sqrt{\frac{2s}{9{,}808}};$$

daraus ergiebt sich die quadratische Gleichung:

$$s^2 - 27447\,s = - 3515250,$$

woraus

$$s = 162 \text{ Meter}.$$

117. Die 34. Kolonne.

Wellenlänge und Schwingungszahl der Töne.

118. 80 Centimeter.

119. $z = 426{,}2$, also die Schwingungsdauer $t = \frac{1}{426{,}2}$ Sekunde.

120. $l = 100$ Centimeter.

121. Für den fraglichen Ton ist die Schwingungszahl

$$z = 341$$

also die Schwingungsdauer desselben $\frac{1}{341}$ Sekunde.

122. Der fragliche Ton ist nicht merklich von dem eingestrichenen *f* verschieden, dessen Schwingungszahl 341,6 ist.

123. Zur Bestimmung der Schwingungszahl von $\bar{c}$ hat man die Proportion

$$40 : 24 = 427 : x,$$

also die Schwingungszahl von $\bar{c}$ gleich 256.

Ferner ergiebt sich für die Schwingungszahl

von $\bar{e}$	. . . .	320
„ $\bar{g}$	. . . .	384
„ $\bar{\bar{c}}$	. . . .	512

124. 39,93 Centimeter.

125. $z = 64 \quad l = \frac{1}{4}\,\lambda = \frac{n}{4z} = 133{,}2$ Centimeter.

126. $\lambda = 0{,}947$ Centimeter.

127.

d	144	*e*	160	*f*	170,6
g	192	*a*	213	*h*	240
		$\bar{c}$	256		

128.

cis	135,6	*f*	170,9	*a*	215,3
d	143,6	*fis*	181,8	*b*	227,1
es	152,2	*g*	191,8	*h*	241,7
e	161,2	*gis*	203,2	$\bar{c}$	256

Töne gespannter Saiten.

129. Die Länge der Saite müßte sein:

für *d*	. . .	889	Millimeter.
„ *e*	. . .	800	„
„ *f*	. . .	750	„
„ *g*	. . .	667	„
„ *a*	. . .	600	„
„ *h*	. . .	533	„
„ $\bar{c}$	. . .	500	„

130. Die Spannung müßte sein:

für *d*	. . .	5,06	Kilogramm.
„ *e*	. . .	6,25	„
„ *f*	. . .	7,11	„
„ *g*	. . .	9,00	„
„ *a*	. . .	11,11	„
„ *h*	. . .	14,06	„
„ $\bar{c}$	. . .	16,00	„

131. Die Dicke der Saite müßte sein:

für e	. . .	0,96 Millimeter.
„ g	. . .	0,80 „
„ $\bar{c}$	. . .	0,60 „

Vibrirende Streifen und Stäbe.

132. a. Die Dicke des Stahlstabes müßte sein:

für die große Terz . . $e = 7 \cdot {}^5/_4 = 8{,}75$ Millimeter,
für die Quinte . . . $e = 7 \cdot {}^3/_2 = 10{,}5$ „
für die Oktave . . . $e = 7 \cdot 2 = 14$ „

b. die Länge des Stabes muß sein:

für die große Terz . . $l = 15 \sqrt{{}^4/_5} = 13{,}416$ Centimeter,
für die Quinte . . . $l = 15 \sqrt{{}^2/_3} = 12{,}247$ „
für die Oktave . . . $l = 15 \sqrt{{}^1/_2} = 10{,}605$ „

133. Eine Verkürzung der Stimmgabeläste hat eine Erhöhung des Tones zur Folge.

134. Der Ton wird tiefer.

Drittes Buch.

Optik.

Photometrie.

135. Die Leuchtkraft der Lampe ist 15,1mal stärker als die der Kerze.

136. Die Leuchtkraft der Gasflamme ist gleich der von 9 Wachskerzen. Die gleiche Erleuchtung mit Wachskerzen hervorgebracht würde 7,2mal teurer sein.

137. Es ist die Stärke der Erleuchtung
in *A* und *E* . . . . . . 1,36.
in *C* und *G* 2
in *B*, *D*, *H* und *F* . . . 1,7.

138. Die Stärke der Erleuchtung würde sein
in *A* und *E* 0,75
in *C* und *G* 3
in *B*, *D*, *H* und *F* . . . 1,5.

139. a. Die Lichtstärke der Öllampe verhält sich zu der der Petroleumlampe wie 7569 zu 5625.
b. Die Öllampe 51 Gramm, die Petroleumlampe 35 Gramm.
c. Die Petroleumlampe hat für 1,3, die Öllampe hat für 4,5 Pfennig verzehrt.
d. Für 1,75 Pfennig.
e. Bei gleicher Lichtstärke verhalten sich also die Kosten einer Petroleumlampe zu denen einer Öllampe wie 1,75 : 4,5 oder wie 7 zu 18.

Ebene Spiegel.

140. $tang.\ v = {}^{1}/_{4000} = 0{,}00025$
$v = 52$ Sekunden.

141. Zeichnung!

Hohlspiegel.

142. a. Der Krümmungshalbmesser des Hohlspiegels ist 54 Centimeter.
b. Die Brennweite des Hohlspiegels beträgt 4 Centimeter.

143 bis 149 sind durch Konstruktion zu lösen. Die Lösung dieser Aufgaben durch Rechnung ergiebt folgende Resultate:

143. 5 Centimeter.
144. 4,6 cm und 6 cm.
145. 12 cm.
(143–145: Sammelbilder.)

146. — 12 Centimeter. Virtuelles Bild.
147. Das Bild des Pfeils ist 1,6 Centimeter hoch.
148. Das Pfeilbild ist 6,8 Millimeter hoch.
149. Das virtuelle Bild liegt 4 Centimeter weit hinter dem Spiegel und ist 2 Centimeter hoch.

149. a.

$g = \infty$	... $b = 10$ cm	$g = 15$ cm	... $b = 30$ cm
$g = 1000$ cm.	... $b = 10,1$ „	$g = 11,1$ „	... $b = 100$ „
$g = 100$ „	... $b = 11,1$ „	$g = 8$ „	... $b = -40$ „
$g = 50$ „	... $b = 12,5$ „	$g = 6$ „	... $b = -15$ „
$g = 30$ „	... $b = 15,0$ „	$g = 5$ „	... $b = -10$ „
$g = 20$ „	... $b = 20,0$ „	$g = 3$ „	... $b = -4,3$ „

Konvexspiegel.

150 und 151. Konstruktionslösungen.

Das Brechungsgesetz.

152. $n = \frac{\sin 60^0}{\sin 40^0\, 14'} = \frac{0,866}{0,646} = 1,34.$

153. $n = 1,53.$

154.

r	i
10^0	$13^0\,27'$
20	27 16
30	42 4
40	59 30.

155.

i	r	i	r
10^0	$7^0\,17'$	60^0	$40^0\,16'$
20	14 47	70	44 31
30	21 54	80	47 18
40	28 40	90	48 15
50	34 52		

156. $r = 25^0\ 56'$.

157. Die zusammengehörigen Werte von i und r sind:

i	r	i	r
5⁰	3⁰ 15′	55⁰	32⁰ 21′
15	9 44	65	36 19
25	16 1	75	39 8
35	22 1	85	40 37
45	27 31		

Die Aufgaben 154 bis 157 lassen sich auch durch Konstruktion lösen, wie es für einige der obigen Beispiele entwickelt werden soll.

Ein Strahl, welcher aus Luft in Glas übergeht, macht vor seinem Eintritt einen Winkel von 42⁰ mit dem Einfallslot; es soll die Richtung des gebrochenen Strahls durch Konstruktion ermittelt werden.

Es sei AB, Fig. 617, die Grenzfläche zwischen Luft und Glas. In dem Punkt a, in welchem der einfallende Strahl die Glasfläche trifft, errichtet man zunächst das Perpendikel CD, das Einfallslot, und zieht dann die Linie ab

Fig. 617.

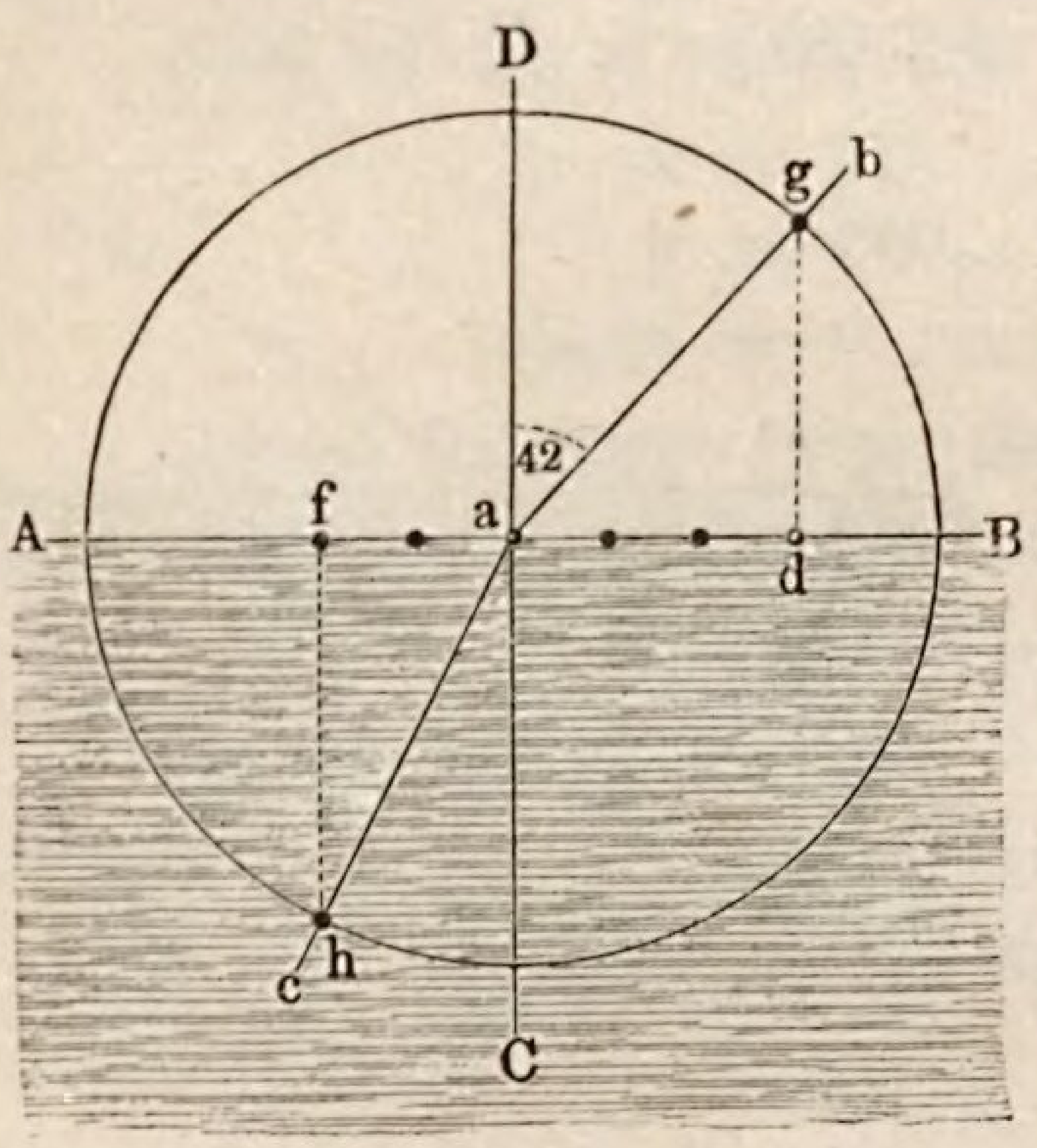
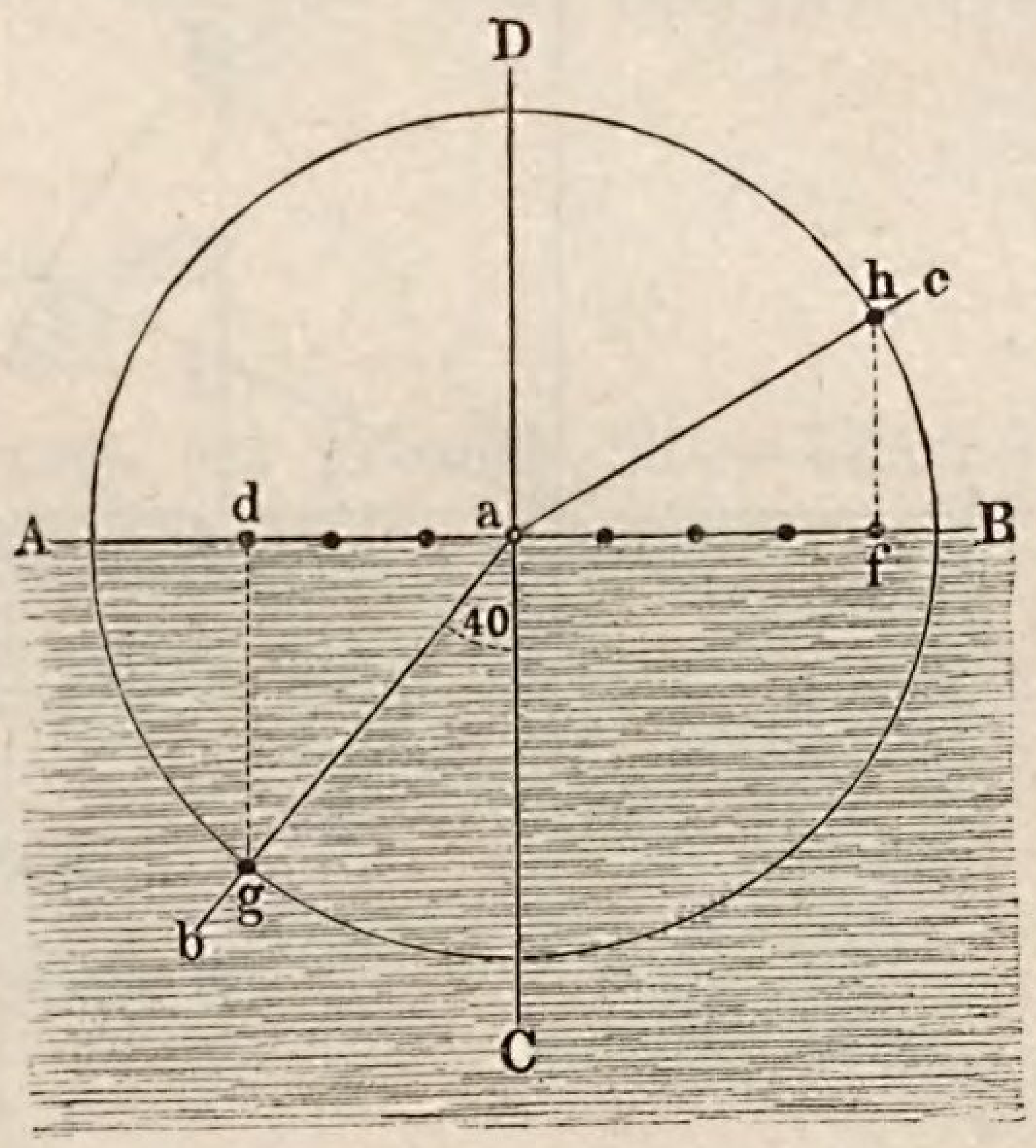


Fig. 618.



so, daß sie einen Winkel von 42⁰ mit dem Einfallslot macht, alsdann stellt ab den einfallenden Strahl vor.

Man trage nun von a aus nach der Seite des einfallenden Strahls nach einem beliebigen Maßstab auf AB die Länge $ad = 3$, nach der anderen Seite aber $af = 2$ auf (angenommen, daß beim Übergang aus Luft in Glas der Brechungsexponent $^3/_2$ ist), und errichte in d ein Perpendikel, welches den einfallenden Strahl in g schneidet.

Wird nun ferner mit dem Radius ag ein Kreis beschrieben und durch den Punkt h, in welchem derselbe das in f errichtete Perpendikel trifft, eine Linie nach a gezogen, so ist diese Linie ca die Richtung des gebrochenen Strahls.

Die Richtigkeit dieser Konstruktion ist nach §. 134 des Grundrisses leicht zu beweisen.

Nach derselben Methode ist in Fig. 618 (a. v. S.) die Richtung eines Strahls *ac* in Luft konstruiert, wenn der Winkel, welchen der zugehörige gebrochene Strahl im Wasser mit dem Einfallslote macht, gleich 40° ist.

Fig. 619 und 620 erläutern eine andere Methode für die Konstruktion des gebrochenen Strahls.

Fig. 619 bezieht sich auf die Brechung beim Übergang aus Luft in Glas (Brechungsexponent $^3/_2$), und zwar ist der Wert des Einfallswinkels = 65°.

Nachdem das Einfallslot *CD* und die Richtung des einfallenden Strahls *ab* gezogen sind, werden auf dem letzteren nach beliebigem Maßstab zwei Stücke *ad* und *af* aufgetragen, welche sich verhalten wie der Sinus des Brechungswinkels zum Sinus des Einfallswinkels, in unserm Fall also wie 2 zu 3. Durch *d* wird nun eine Linie parallel mit dem Einfallslot, also rechtwinkelig zu *AB* und um *a* mit dem Halbmesser *af* ein Kreisbogen gezogen, welcher das

Fig. 619.

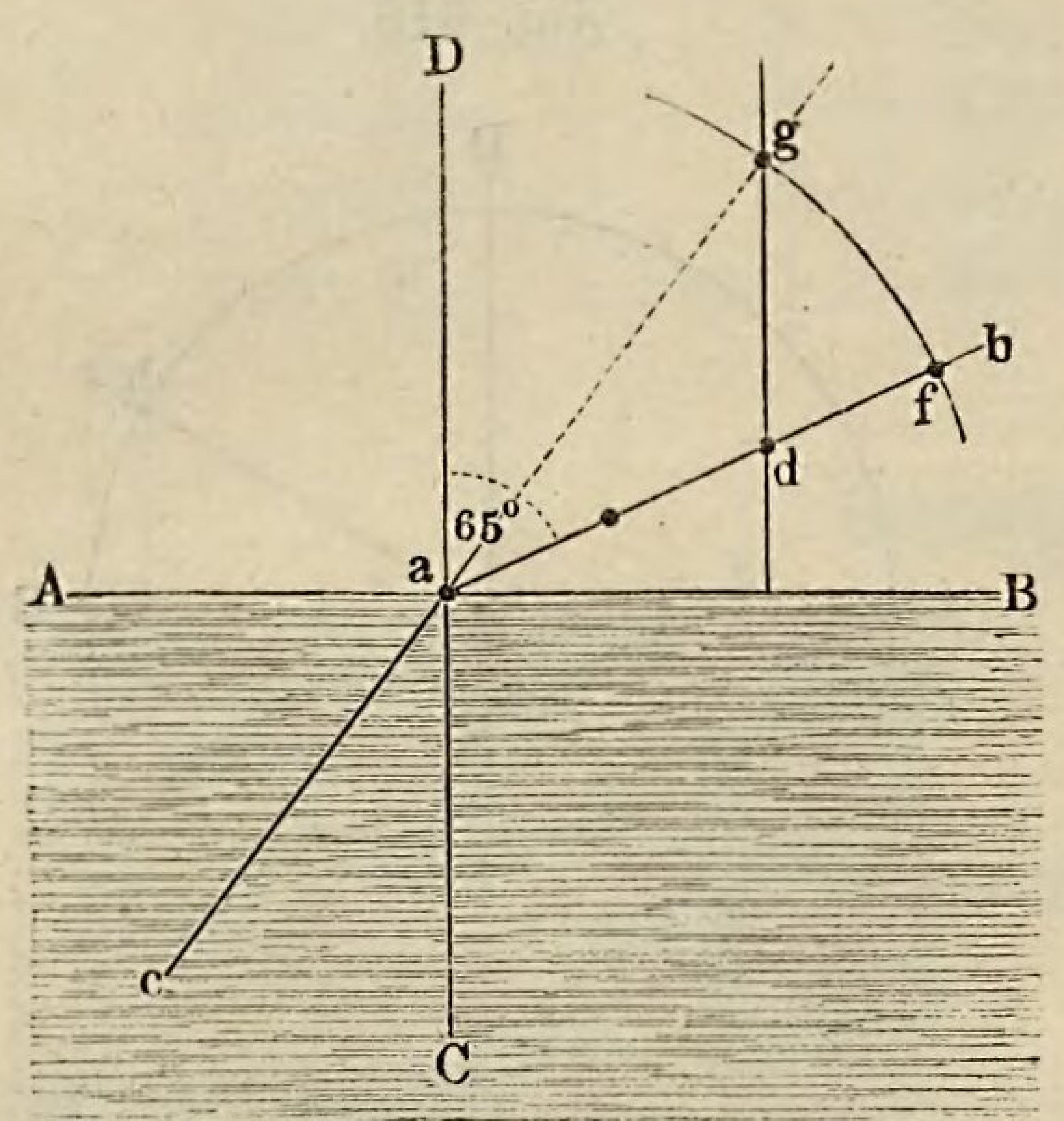
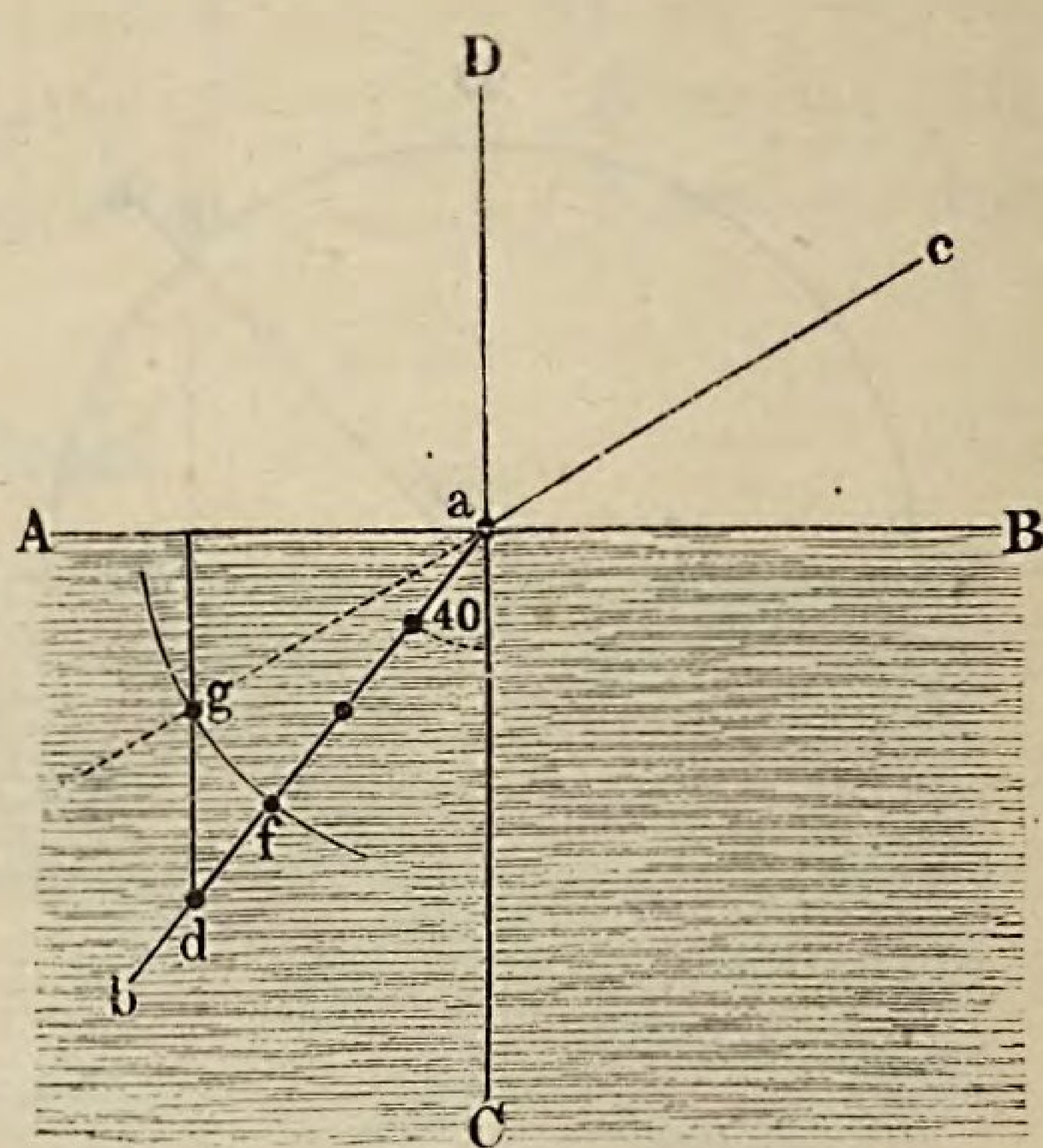


Fig. 620.



durch *d* gezogene Perpendikel in *g* schneidet. Die Linie *ac* nun, welche die Verlängerung von *ga* ist, ist die Richtung des gebrochenen Strahls.

Der Beweis für die Richtigkeit dieses Verfahrens ist leicht zu führen. In dem Dreieck *adg* verhalten sich die Sinus der Winkel *agd* und *adg* wie *ad* zu *ag*, also wie 2 : 3; *agd* ist aber dem Brechungswinkel *caC* gleich, während *adg* der Nebenwinkel von *gdb* ist, welcher selbst gleich ist dem Einfallswinkel *Dab*. Wir haben also $\sin caC : \sin Dab = 2 : 3$, wodurch die Richtigkeit der Konstruktion bewiesen ist.

Nach dieser Methode ist in Fig. 620 die Richtung des aus Wasser in Luft austretenden Strahles *ac* konstruiert, wenn der im Wasser sich fortpflanzende Strahl *ba* einen Winkel von 45° mit dem Einfallslote macht.

158. Der Wert des Grenzwinkels ist für:

Wasser	$48^0\,15'$
Alkohol	46 52
Benzol	41 48
Crownglas	40 49
Flintglas.	37 36
Schwefelkohlenstoff . . .	36 31
Diamant	23 53

159. Der Brechungsexponent für den Übergang aus Wasser in Benzol ist 1,1194.

160. Für den Übergang aus Wasser in Schwefelkohlenstoff ist der Brechungsexponent 1,2537.

161. Für den Übergang eines Lichtstrahls aus Benzol in Wasser ist der Grenzwinkel $64^0\,23'$.

162. Der fragliche Grenzwinkel ist $52^0\,54'$.

Ablenkung der Lichtstrahlen durch Prismen.

163. Wenn der Winkel *lno*, Fig. 621, den wir mit i bezeichnen wollen, gleich 52^0 ist, so ergiebt sich:

$$x = 31^0$$
$$y = 60 - 31 = 29^0$$
$$l'n'o' = t' = 47^0\,54',$$

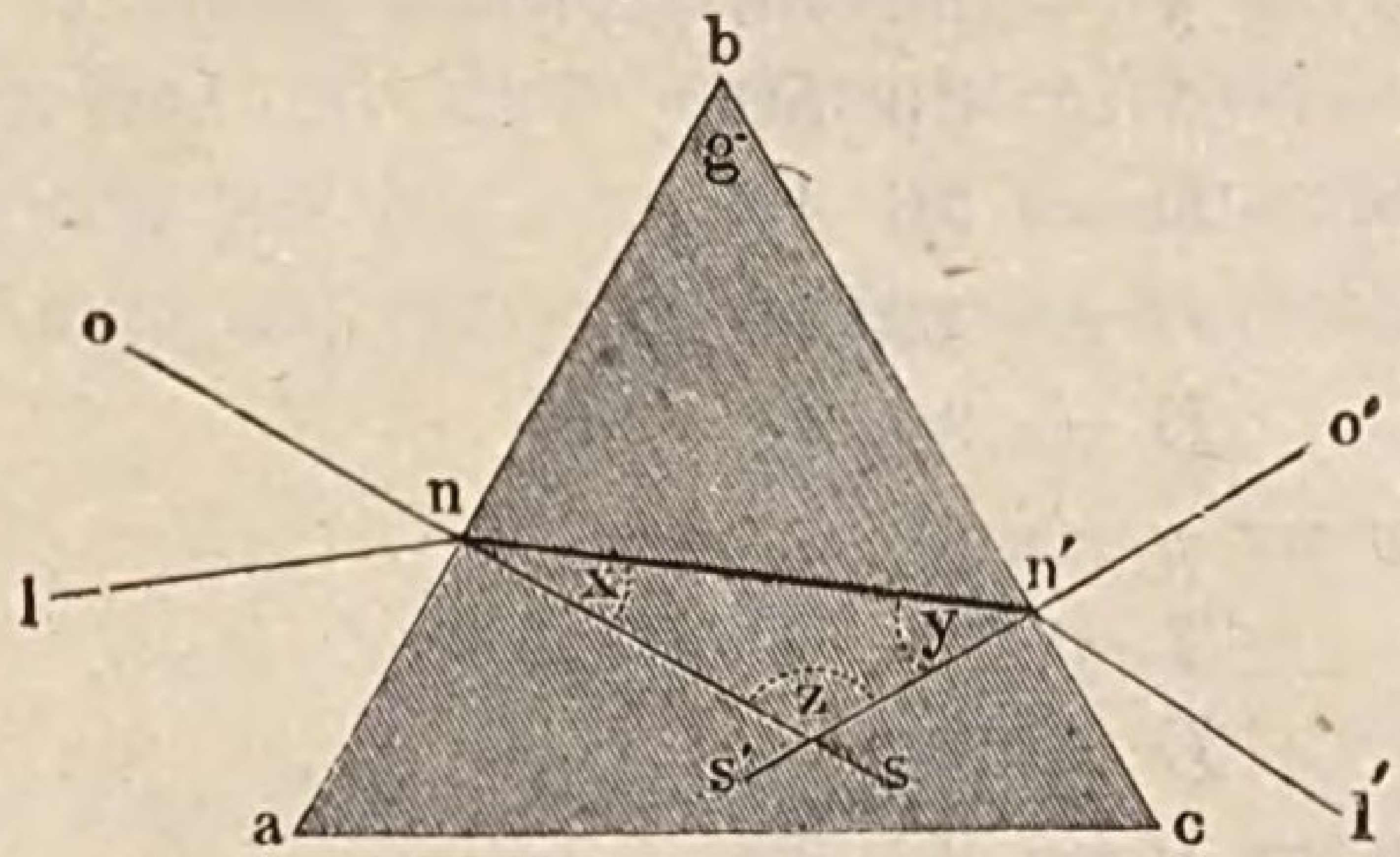
also die Ablenkung an der Vorderfläche des Prismas $52 - 31 = 21^0$; die Ablenkung an der Austrittsfläche aber ist:

$$47^0\,54' - 29^0 = 18^0\,54'$$

und die Totalablenkung

$$D = 39^0\,54$$

Fig. 621.



164. a. $i = 48^0\,35'$ b. $i = 42^0$

a.		b.	
$i =$	$48^0\,35'$	$i =$	42^0
$x =$	29 21	$x =$	25 56'
$y =$	30 39	$y =$	34 4
$i' =$	51 16	$i' =$	59
$D =$	39 51	$D =$	41.

165.
$$i = 52^0$$
$$x = 28\ 54{,}5'$$
$$y = 31\ \ 5{,}5$$
$$i' = 57\ 18{,}5$$
$$D = 49\ 18{,}5.$$

166. a. $i = 39^0$ b. $i = 31^0$

a. $i = 39^0$	b. $i = 31^0$
$x = 24\ 17'$	$x = 19\ 40'$
$y = 20\ 33$	$y = 25\ 20$
$i' = 32\ 49$	$i' = 40\ 54$
$D = 26\ 46.$	$D = 26\ 54.$

c. $i = 28^0$
$$x = 17\ 52'$$
$$y = 27\ \ 8$$
$$i' = 44\ 15$$
$$D = 27\ 15.$$

167.

i	D
0^0	$3^0\ 12'$
10	3 12,7
20	3 41,5.

168. $x + y = g.$

169. a) $x = y = \frac{g}{2}$,

b) $x = y = 30^0$,

c) $x = y = 22{,}5^0$.

170. a. $x = y = \frac{60}{2} = 30^0$

$$i = 49^0\,54'$$
$$D = 2\,(49^0\,51' - 30^0) = 39^0\,48'.$$

b. $x = y = 22^0\,30'$
$$i = 35\ 50$$
$$D = 26\ 40.$$

$c\alpha$. $D = 49\ 10.$

$c\beta$. $D = 32\ 12.$

$d\alpha$. $x = y = 30^0$
$$i = 42\ \ 4'$$
$$D = 24\ \ 8.$$

$d\beta$. $x = y = 22\ 30$
$$i = 30\ 51$$
$$D = 16\ 42.$$

Berechnung der Brechungsexponenten.

171. $\frac{D + g}{2} = \frac{48^0\,30' + 60}{2} = 54^0\,15'$,

$\frac{g}{2} = 30^0$

$n = \frac{\sin\, 54^0\,15'}{\sin\, 30^0} = 1{,}623.$

172. $n = 1{,}517.$

Sammellinsen.

173. Die Brennweite der Linse beträgt 2 Centimeter.

174 bis 179. Konstruktionsaufgaben. Die Rechnung ergiebt folgende Resultate:

174. $b = 2{,}25.$

175. $b = 2{,}4 \ldots b = 2{,}666 \ldots b = 3{,}0 \ldots b = 3{,}333.$

176. Für $g = 1{,}5$ Centimeter ist $b = -6$ Centimeter, das Bild ist also ein virtuelles.

176 a.

g	*b*	*g*	*b*
500 cm	10,2 cm	15 cm	30 mm
200 „	11,1 „	12 „	60 „
30 „	15,0 „	9 „	— 90 „
20 „	20,0 „	6 „	— 15 „

176 b. Für eine Linse von 10 Centimeter Brennweite muß der Gegenstand aus unendlicher Entfernung auf 110 Centimeter der Linse genähert werden, wenn der Schirm, auf welchem das scharfe Bild aufgefangen wird, von 10 bis auf 11 Centimeter entfernt wird. — Für eine Linse von 8 Centimeter Brennweite muß man den Gegenstand von 40 bis 29,5 Centimeter nähern, wenn das scharfe Bild gleichfalls auf einem zwischen 10 und 11 Centimeter von der Linse entfernten Schirm aufgefangen werden soll. — Es macht dies klar, warum die Accommodationsfähigkeit eines kurzsichtigen Auges auf weit engere Grenzen beschränkt ist, als die eines fernsichtigen.

Fernröhre.

180. Das Fernrohr vergrößert 2,28 mal.

181. Die Zerstreuungsweite des Okulars muß $1^1/_3$ Centimeter sein.

182. Die Brennweite des Objektivs müßte 21 Centimeter betragen.

183. Das Fernrohr vergrößert 52 mal.

184. Die Brennweite des Okulars müßte 1,21 Centimeter betragen.

Viertes Buch.

Die elektrischen Erscheinungen.

Die Tangentenbussole.

185. Dem Ablenkungswinkel entspricht die Stromstärke

Ablenkungswinkel	Stromstärke
10^0	0,176
20	0,364
30	0,577
40	0,839
50	1,192
60	1,732
70	2,747
80	5,671
85	11,430.

186. Der Stromstärke entspricht die Ablenkung

Stromstärke	Ablenkung
0,5	$26^0\ 34'$
2	63 27
5	78 42
10	84 18
20	87 9.

Das Ohm'sche Gesetz.

187. $S = 45$.

188. $S = 46{,}6$.

189. Für 10 Becher $S = 66{,}6$.
Für 50 Becher $S = 69{,}3$.

190. a. $S = 2$,
b. $S = 16$.
c. $S = 42$.

191. a. $S = 17{,}9$. b. $S = 18{,}0$.
cα. $S = 22{,}8$. cβ. $S = 23{,}3$.
dα. $S = 1{,}11$. dβ. $S = 7{,}8$. dγ. $S = 16{,}7$.

Leitungswiderstand der Metalle.

192. $W = 83{,}19.$
193. $W = 74{,}15.$
194. $d = 6{,}05$ Millimeter.
195. $l = 158{,}8$ Meter.
196. Die Beobachtung (a) führt zur Gleichung

$$92{,}89 = \frac{E}{L} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Die Beobachtung (b) führt zur Gleichung

$$14{,}24 = \frac{E}{L + 50} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Durch Kombination von (1) und (2) ergiebt sich

$$L = 9.$$

Nach der Beobachtung (c) ist

$$25{,}48 = \frac{E}{L + s} = \frac{E}{9 + s} \quad . \quad . \quad (3)$$

Gleichung (1) dividiert durch Gleichung (3) giebt

$$\frac{92{,}89}{25{,}48} = \frac{9 + s}{9}$$

daraus $s = 23{,}8.$

197. $L' = 35,$
$s = 26{,}8.$

Das Mittel der beiden in (196) und (197) erhaltenen Werte von s ist 25,3.

198. $l = 8{,}3 \qquad r = 4{,}45.$

Aichung der Tangentenbussole.

199. Aus der Gleichung:

$$35 = R \,.\, tang\; 24^0\, 18'$$

ergiebt sich:

$$R = 77{,}52.$$

200. a. $R = 76{,}80$
b. $R = 75{,}75$
c. $R = 76{,}23$
d. $R = 76{,}59$
e. $R = 76{,}42$
f. $R = 76{,}45.$

Der Mittelwert des Reduktionsfaktors ist

$$R = 76{,}373.$$

Fünftes Buch.

Von der Wärme.

Das Thermometer.

201. 23^0 C. = $18{,}4^0$ R.
202. 78^0 C. = $172{,}4^0$ F.
203. 61^0 R. = $67{,}25^0$ C.
204. 93^0 F. = $33{,}8^0$ C.
205. 105^0 F. = $32{,}4^0$ R.
206. — 12^0 R. = 5^0 F.
207. Für — 40^0.
208. Für — $25{,}6^0$.
209. Bezeichnet man die Temperaturangabe der willkürlichen Skala mit w, die gleichwertigen nach Celsius, Reaumur und Fahrenheit beziehungsweise mit c, r und f, so erhält man:

$w - 15 = \frac{3}{2}\,c$ und hieraus $c = \frac{2}{3}\,(w - 15)$

$w - 15 = \frac{15}{8}\,r$ „ „ $r = \frac{8}{15}\,(w - 15)$

$w - 15 = \frac{5}{6}\,(f - 32)$ „ „ $f = \frac{6}{5}\,w + 14.$

Lineare Ausdehnung fester Körper.

210. 60,02928 Meter.
211. 59,985 Meter.
212. 1182 Millimeter.
213. $a = 0{,}00001733.$
214. $a = \frac{L_t - L_o}{t\,.\,L_o}.$
215. 1,80203 Meter.
216. 4,50306 Meter.
217. $L = L_t\,\{1 + a\,(T - t)\}.$
218. $R = 1{,}106\,T.$
219. $R = 0{,}34\,T.$

Kubische Ausdehnung.

220. Tabelle der kubischen Ausdehnung für eine Temperaturerhöhung von 0 bis 100 Grad.

Platin	0,00258
Glas	0,00261
Stahl	0,00378
Eisen	0,00366
Kupfer	0,00513
Messing	0,00564
Blei	0,00855
Zink	0,00882

221. Bei 32° C. ist der Inhalt des Hohlwürfels 1,002882 Kubikdecimeter.

222. Bei 100° C. ist der Inhalt des Glasgefäßes 1002,61 Kubikdecimeter.

223. Bei 100° C. ist das specifische Gewicht des Bleies 11,25.

224. Der Längenausdehnungskoëfficient des Kaliglases ist 0,000007, der des Natronglases ist 0,0000086.

225. Der Koëfficient der Längenausdehnung für Quarz ist 0,000014.

Ausdehnung der Flüssigkeiten.

226. Für eine Temperaturerhöhung von 100° C. dehnt sich das Quecksilber (scheinbar) aus im Verhältnis von 260 zu 264 oder von 1 zu 1,01538. Der Koëfficient der scheinbaren Ausdehnung ist also 0,0001538 (auf 1° bezogen), der Koëfficient der wahren Ausdehnung ist also:

$$0{,}0001538 + 0{,}000026 = 0{,}0001798.$$

227. Der Koëfficient für die scheinbare Ausdehnung des Benzols ist:

$$0{,}001161,$$

der der wahren Ausdehnung ist: 0,001187.

228. 1,092 Liter.

229. 1,042 Liter.

230. Bei 20° C. ist das specifische Gewicht des absoluten Alkohols 0,7774.

231. Bei 0° C. würde die Barometerhöhe 748,7 Millimeter sein.

Ausdehnung der Gase.

232. 49,86 Kubikmeter.

233. 67,24 Kubikcentimeter.

234. $s = 0{,}000965$

Schmelzungswärme.

235. 79,2.

236. 469,7 Gramm.

237. 15,67°.

238. 25 Gramm Eis werden geschmolzen sein.

Spannkraft der Dämpfe.

239. Die Temperatur, welche der Spannkraft von $^1/_4$ Atmosphäre entspricht, ergiebt sich in folgender Weise.

$$\log 0{,}25 = 5{,}58188 \log \{1 + 0{,}0062108\,(t - 100)\}$$
$$0{,}39794 - 1 = 5{,}58188 \log \{1 + 0{,}0062108\,(t - 100)\}$$
$$-\,0{,}60206 = 5{,}58188 \log \{1 + 0{,}0062108\,(t - 100)\}$$
$$-\,0{,}107860 = \log \{1 + 0{,}0062108\,(t - 100)\}$$
$$0{,}89214 - 1 = \log \{1 + 0{,}0062108\,(t - 100)\}$$
$$0{,}78018 = 1 + 0{,}0062108\,(t - 100)$$
$$t = 100 - 35{,}4 = 64{,}6.$$

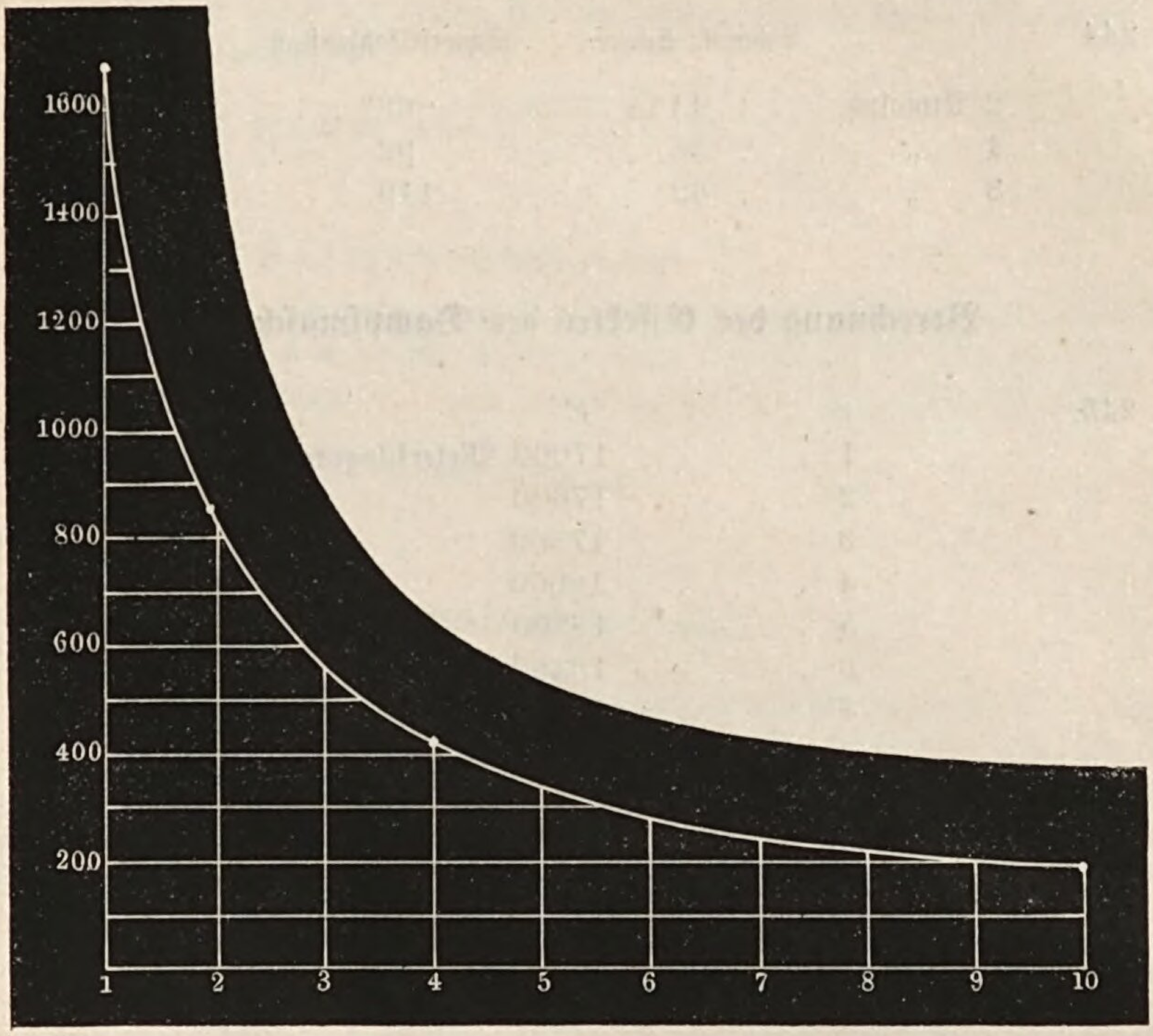
Spannkraft	Temperatur
$^1/_4$ Atmosph.	64,6°
$^1/_2$ „	84,9
$^3/_4$ „	91,9
1 „	100,0
3 „	135,0
5 „	153,6

240.

Temperatur	Spannkraft
25°	0,03 Atmosph.
55	0,16 „
95	0,84 „
120	1,92 „
150	4,52 „
180	9,47 „

241. Die Lösung ist durch Fig. 622 in der Weise gegeben, daß der Maßstab der Ordinaten halb so groß genommen ist als in der Aufgabe verlangt wurde.

Fig. 622.



242. Aus Fig. 622 ergeben sich folgende zusammengehörige Werte von p und V:

p		V	
1	Atmosph.	1646	Liter
2	„	851	„
3	„	575	„
4	„	436	„
5	„	352	„
6	„	296	„
7	„	256	„
8	„	226	„
9	„	202	„
10	„	183	„

243.

Spannkraft	Temperatur
2 Atmosph.	$100{,}7^0$
4 „	124,7
8 „	151,7

244

	Schwefl. Säure.	Schwefelkohlenstoff.	Terpentinöl.
2 Atmosph.	11^0	68^0	178^0
4 „	35	92	202
8 „	62	119	229

Berechnung des Effektes der Dampfmaschinen.

245.

p	E
1	17000 Meterkilogramm
2	17600 „
3	17800 „
4	18000 „
5	18200 „
6	18350 „
7	18500 „
8	18650 „
9	18800 „
10	18900 „

246. Nach den gegebenen Daten haben wir für diesen Fall:

$$p = 4,$$

für die Anzahl der in 1 Minute gemachten Kolbenschläge:

$$n' = 40,$$

den Querschnitt des Kolbens:

$$Q = 1{,}5^2 . 3{,}14 = 7$$

und endlich

$$L = 9.$$

Demnach ist nach Gleichung (1):

$$E = 10{,}33 . 4 . 40 . 7 . 9 = 104000 \text{ Kilogrammometer.}$$

Nehmen wir die Hälfte dieses Wertes, also

52000 Kilogrammometer

als nutzbare Arbeit der Maschine, so ist dieselbe äquivalent:

$$\frac{52000}{4500} = 11{,}5 \text{ Pferdekräften,}$$

da die Arbeit einer Pferdekraft in der Minute 75 . 60 = 4500 Kilogrammometer beträgt.

247. Die Kraftleistung von 10 Pferdekräften ist gleich 750 Kilogrammometer per Sekunde, also 750 . 3600 = 2700000 Kilogrammo=

metern in 1 Stunde. Setzen wir die nutzbare Kraft der Dampfmaschine gleich der Hälfte des absoluten Effekts, so haben wir also für den gegebenen Fall:

$$2700000 = \frac{10{,}33 \,.\, 6 \,.\, V}{2},$$

also

$$V = 87098 \text{ Kubikdecimeter}$$

als Volum des verbrauchten Dampfes. Da aber 1 Kilogramm Wasserdampf von 6 Atmosphären Spannkraft einen Raum von 296 Kubikdecimetern einnimmt, so beträgt das Quantum des verbrauchten Wassers:

$$\frac{87097}{296} = 294 \text{ Kilogramm.}$$

Verdampfungswärme.

248. Man findet für die latente Wärme des Wasserdampfes 543,5.

249. $60\,(22 - 8) = 3x + 3(80 - 22)\,.\,0{,}5,$

$$x = 251$$

als latente Wärme des Weingeistdampfes.

250. Als latente Wärme des Ätherdampfes findet man die Zahl 97.

251. a. $t = 31^0$.

b. Die Bedingungen der Aufgabe führen zu der Gleichung:

$$25\,.\,214 + (80 - t)\,.\,25\,.\,0{,}5 = (t - 10)\;420,$$

wenn man mit t die gesuchte Temperatur bezeichnet, für welche man findet:

$$t = 24^0 \text{ C.},$$

wenn man für die latente Wärme des Alkoholdampfes den genaueren Wert 214 in Rechnung bringt,

c. $t = 19^0$ C.,

wenn man für die latente Wärme des Ätherdampfes den genaueren Wert 90 in Rechnung bringt.

Specifische Wärme.

252. 1177 Wärmeeinheiten.

253. 955836 Wärmeeinheiten.

254. Es sind 48614 Wärmeeinheiten nötig, um die Temperatur von 1523 Gramm Weingeist von 15° C. auf 63° C. zu erhöhen.

255. Für die specifische Wärme des Eisens ergiebt sich aus diesem Versuch 0,115.

256. Die specifische Wärme des Quecksilbers ist gleich 0,0318.
257. Für die specifische Wärme des Benzols ergiebt sich der Wert 0,348.
258. Die Temperatur des Gemenges ist 18,3° C.
259. Die Temperatur des Kühlwassers steigt auf 16° C.
260. Die Temperatur der Platinkugel war 1097° C.
261. Die specifische Wärme des Eisens ergiebt sich gleich 0,115.

Alphabetisches Inhaltsverzeichnis.

A.

G.

H.

J.

K.

L.

M.


Q.

R.

S.

W.

Z.


H G F E D C B A
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
In Th Na Li
12